Reinhard Breuer
Chefredakteur

Die Haut und ihre Mythen

Was ist das: Es wiegt zwölf Kilo und bedeckt eine Fläche von zwei Quadratmetern? Richtig geraten, es ist unsere Haut. Über dieses größte Organ unseres Körpers sind selbst Grundkenntnisse, das muss man leider sagen, nicht besonders verbreitet. Die Gefahren allzu üppiger Sonnenanbetung predigen Ärzte allenthalben. Dass solche Warnungen aber häufig ignoriert werden, liegt an mehreren Alltagsmythen, die sich hartnäckig um das Thema Haut ranken.

Waschmarotte: Die Oberhaut besitzt einen fett- und wasserhaltigen Schutzfilm, der nicht nur Wasser abstößt und die Haut geschmeidig hält, sondern auch Bakterien und Pilzbewuchs abwehrt. Allzu häufiges Waschen zerstört diesen Schutzfilm. Hautärzte halten es für ausreichend, alle zwei Tage zu duschen.

Bräune: Blässe ist keine Krankheit, sagen Mediziner, und warnen generell vor zu viel Sonne und Strand. Dennoch bevorzugt unsere Wellness-Society die gebräunte Haut als Erfolgs- und Gesundheitssymbol. Dabei gibt es keine »gesunde« Bräune, Schäden im Erbgut der Hautzellen sind der Preis. Besonders Kinder sind gefährdet.

Hautkrebs: Rund 2700 Menschen sterben in Deutschland jährlich an schwarzem Hautkrebs. Ausgelöst wird diese gefährliche Krebsart vor allem durch die energiereiche UV-B-Strahlung. Aber auch die energieschwächere UV-A-Strahlung, wie sie Sonnenstudios verwenden, erhöht das Krebsrisiko und lässt die Haut vorzeitig altern.

Falten: Die Haut altert unvermeidlich, sie wird im Laufe der Jahre zwangsläufig trockener und unelastischer. Doch die beste Vorsorge gegen die »äußere Alterung« ist immer noch ein ausgeglichener Lebenswandel, nicht rauchen, kein Alkohol. Wundermittel gibt es nicht. Mit »Anti-Falten-« oder gar »Anti-Aging-Cremes« aller Sorten werden zwar Milliarden verdient, in erster Linie aber nur psychosomatische Wirkungen erzielt. Zahllose Zusätze versuchen den kindlich zarten Zustand der Haut, nämlich fettarm und wasserreich, zu erhalten. Ob Liposome, Vitamine, Kollagen, Duft- und Färbemittel oder Feuchtigkeitszusätze – weder eine kosmetische noch eine medizinische Wirkung ist bewiesen.

IFA-BILDERTEAM

Zu viel Sonne ist gefährlich – besonders für Kinder.

Hautfarbe: Lange wurden Farbe der Haut und Rasse einander gleichgesetzt – bis Genetiker sich der Sache annahmen und bewiesen, dass zwei Menschen desselben Farbtyps genetisch unterschiedlicher sein können als Menschen verschiedener Hautfarbe. Den klassischen Rassismus hat diese Einsicht natürlich nicht beseitigt; sie hat ihn nur noch absurder gemacht. Die eigentliche Funktion der Hautfarbe beleuchtet unsere Titelgeschichte ab Seite 38: Es geht um die subtile Balance zweier Vitamine, von denen eines durch UV-Strahlung zerstört und das andere aufgebaut wird – beide aber sind lebensnotwendig.

Dass wegen der globalen Mobilität zahllose Menschen heute in Breitengraden leben, die ihrem Hauttyp nicht angemessen sind, ist ein neuzeitliches Problem – mit allen Negativfolgen für unsere Gesundheit.

Seit über 40 Jahren entführt STERNE UND WELTRAUM seine Leser monatlich in die faszinierende Welt der Astronomie und fachverwandter Gebiete. Fest verankert am Heidelberger Max-Planck-Institut für Astronomie, bürgt die Redaktion vor allem für ausgewiesene fachliche Kompetenz und eingehende Berichterstattung.

Sie finden in jeder Ausgabe:
- ▶ Große abgeschlossene Aufsätze zu den Themen der Forschung
- ▶ Aktuelle Kurzberichte und Hinweise für Beobachter
- ▶ Die Himmelsereignisse des Monats
- ▶ Tipps für die Astropraxis
- ▶ Zum Nachdenken: Nehmen Sie teil an der Lösung aktueller Forschungsprobleme!
- ▶ Surf-Tipps

Nehmen Sie uns beim Wort und testen Sie unter

www.suw-online.de

STERNE UND WELTRAUM über 3 Ausgaben im günstigen Miniabonnement für nur € 12,90 (inkl. Porto) und sparen Sie € 9,90 gegenüber dem Einzelpreis. Als Dank für Ihre Bestellung schenken wir Ihnen das T-Shirt „Sonnen-Protuberanzen".

Alle Preise verstehen sich inkl. Umsatzsteuer.

INHALT

FORSCHUNG AKTUELL

12 Bakterien mit Thermometer
Molekulare Haarnadel, die sich in der Wärme öffnet, blockiert Regulator-Gen

14 Maya-Schrift von Olmeken erfunden?
Entdeckung der ältesten Schriftzeugnisse Mittelamerikas

20 Umordnung der Atomhülle in Zeitlupe
Attosekundenblitz zeigt, wie ein Loch in der inneren Elektronenschale gefüllt wird

22 Von Knochen und Knorpeln
Neue Einblicke in die Ursache der häufigsten Form von Kleinwuchs

25 Bild des Monats
Blitzstart

SPEKTROGRAMM

36 Einmaleins im Vogelnest · Sterbender Stern als Scheinwerfer · Mit Minidolchen gegen Mikroben · Ältester Andengott · Starke Beben mit schwachen Folgen · Stammzellen gegen Multiple Sklerose

THEMEN

28 25 Jahre Spektrum der Wissenschaft Teil VI: Kälter als das All
Nahe dem absoluten Nullpunkt schwingen Atome unisono

38 TITELTHEMA: Hautfarben der Menschen
Zwei Vitamine als Ursache von hell und dunkel

46 Hubble-Konstante
Wie Astronomen das Universum in Zahlen fassen

56 Phytoplankton als Klimaregulator
Kann die Düngung des Meeres mit Eisen dem Treibhauseffekt entgegenwirken?

64 Die Wirkung von Koffein
Wie das Aufputschmittel den Schlaf-Wach-Rhytmus und andere Körperfunktionen beeinflusst

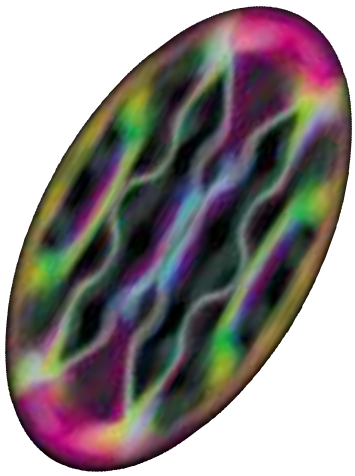
74 Ethnomathematik aus Indien
Die Kolam-Zeichnungen basieren auf ungeschriebenen Algorithmen

82 Mikroelektronik
Jede neue Chip-Generation erfordert neue Schutzmaßnahmen gegen elektrostatische Entladung

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

90 Ausbeutung statt Ausbildung
Warum Jungmediziner dem Krankenhaus den Rücken kehren

Titelbild: In höheren Breiten tragen dunkelhäutige Menschen ein Gesundheitsrisiko, wie umgekehrt hellhäutige in den Tropen. *Bild: Superbild / Zefa*



SEITE 28

SERIE »25 JAHRE SPEKTRUM« (VI)

Ultrakalte Atome

Seit 25 Jahren perfektionieren Physiker ein Verfahren, winzige Gaswölkchen fast auf den absoluten Nullpunkt zu kühlen. Bei diesen extremen Temperaturen werden die seltsamen Quanteneigenschaften der Materie unmittelbar sichtbar.

SEITE 46

KOSMOLOGIE

Das expandierende Universum

Nach Jahren der Ungewissheit haben Astronomen genügend Datenmaterial gesammelt, um die Expansionsbewegung des Kosmos, beschrieben durch die so genannte Hubble-Konstante, berechnen zu können.

SEITE 56

MEERESBIOLOGIE

Der unsichtbare Wald im Meer

Das mikroskopisch kleine Phytoplankton entzieht der Atmosphäre große Mengen Kohlendioxid. Lässt sich dieser Prozess zur Dämpfung der globalen Erwärmung verstärken?

SEITE 64

KAFFEE

Die Alltagsdroge Koffein

Koffein ist das meistbenutzte Aufputschmittel. Im Gehirn heftet es sich an Rezeptoren, die den Schlaf beeinflussen. Aber auch Blutgefäße und Muskeln sowie Herz, Nieren und weitere Organe reagieren auf die Droge.

SEITE 38

TITELTHEMA: MEDIZIN

Die Evolution der Hautfarbe

Schwarze und weiße Haut entstanden als Anpassung an viel oder wenig Sonne. Die Pigmentierung war stets ein Balanceakt zwischen Vitaminen, die durch UV-Strahlung zerstört oder erzeugt werden. Dies zeigen auch moderne Vitaminmangel-Krankheiten aufgrund der heutigen Mobilität.

SEITE 74

ETHNOMATHEMATIK

Die Kolam-Figuren Südindiens

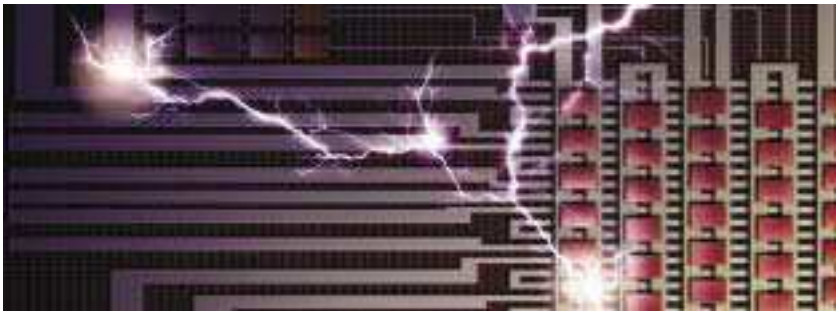
In den traditionellen Schwellenzeichnungen von Tamil Nadu finden theoretische Informatiker überraschende mathematische Strukturen.

SEITE 82

MIKROELEKTRONIK

Blitzableiter für Chips

Abertausende von Transistoren auf immer kleineren Chips? Bauelemente, die nur wenige Atome groß sind? Längst scheint dieser Trend normal, doch elektrostatische Entladungen könnten der Miniaturisierung schon bald ein Ende bereiten.



92 **Strukturgerüst für die europäische Forschung**
Die EU möchte einen »europäischen Forschungsraum« einrichten

93 **Exzellenz in der Grundlagenforschung**
Interview mit Erwin Neher

REZENSIONEN

96 ▷ **Die Ostsee – Eine Natur- und Kulturgeschichte** von Hansjörg Küster ▷ **Where Do We Come From?** von Jan Klein und Naoyuki Takahata ▷ **Was wir wirklich wissen müssen, um die Welt zu verstehen** von Albert Jacquard ▷ **Das Fenster zum Universum** von Leonard Mlodinow ▷ **Riedls Kulturgeschichte der Evolutionstheorie** von Rupert Riedl ▷ **Reise zum Mittelpunkt des Frühstückseis** von Len Fisher ▷ **Ölwechsel!** von Colin J. Campbell et al. ▷ **50 Klassiker – Archäologie** von Wolfgang Korn

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

108 **Angezogene Äpfel und aufdringliche Duschvorhänge**

KOMMENTARE

5 **Editorial**
Die Haut und ihre Mythen

94 **Nachgehakt**
Das zähe Leben der Kalten Fusion

WISSENSCHAFT IM …

63 **Rückblick:** Radiostrahlen aus dem All; Tunnel von Gibraltar u. a.

72 **Alltag:** Autolack

88 **Unternehmen:** Signalübertragung

107 **Internet:** Insekten

WEITERE RUBRIKEN

8 Leserbriefe/Impressum · 110 Preisrätsel · 111 Stellenmarkt · 114 Vorschau

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Volkszählung für die Bronzezeit

Wie viele Menschen lebten in den frühen Dörfern Anatoliens? Wie groß war die Chance, ein hohes Alter zu erreichen? Anthropologen entlocken Knochen die Geheimnisse der Zeit vor 5000 Jahren.

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Wie viel Zukunft für die Teilchenphysik?

Editorial, Februar 2003

Zunächst heißt es, »Hochenergiephysiker haben es nicht leicht«, am Schluss haben wir jedoch ein »perfektes Gespann von LHC und Tesla«. Seiten später verfasst P. Ramond eine jener unsäglichen, teils absurden Darstellungen der Stringtheorie, und dann lässt uns Desy schließlich wissen, dass Hera etwa 2006 seine Aufgabe erfüllt haben wird.

Hat Hera so wenig gekostet, dass man dort ganz cool bald »zumachen« darf? Stringtheorien gibt es so viele, wie ihre Ungereimtheiten zu Tage treten. P. Ramond gibt zu, dass sich ohne neue Beschleuniger »unsere Theorien immer mehr von der physikalischen Realität entfernen«. Müssen wir Milliarden Euro ausgeben, um einige tausend Teilchenphysiker ruhig zu stellen? Erzeugt diese Gruppe ihre Probleme nicht selbst?

Das soziale Elend der Dritten Welt und das Energie- und Trinkwasserproblem werden wir mit Tesla und dem Beweis von Stringtheorien nicht beseitigen. Warum stellen Sie nicht dringendere Fragen? Mit Gott leben wir schon einige tausend Jahre, länger als man uns Sneutrinos aufdrängen will. Teilchenphysiker, seid bitte bescheidener und findet Alternativen.

Prof. Harald Reiss, Heidelberg

Fliegende Anti-Malaria-Waffen

Forschung aktuell, April 2003

Bekämpfung mit DDT

Wir haben derzeit zumindest sechs einheimische Anopheles-Arten, die allerdings zum Teil nur durch DNA-Analysen zu unterscheiden sind.

Anopheles plumbeus (Vektor für *Plasmodium falciparum*) ging bei uns stark zurück, weil zuerst die großen Städte ihre Kanalisation ausbauten und später auch auf dem Lande die Jauchegruben zugeschüttet wurden beziehungsweise gut schließende Abdeckungen erhielten.

Bei der Malariabekämpfung ist DDT immer noch unverzichtbar. Ohne dieses Mittel hätte sich das überschwemmte Mosambik nicht vor Malaria retten können.

Das Bild auf Seite 15 des oben genannten Artikels zeigt statt einer Anopheles-Mücke eine Blut saugende *Aedes aegypti*, die Dengue- und Gelbfieber sowie das West-Nil-Virus überträgt.

Dr. Roland Kuhn, Mainz

ROGER ERITJA

Die weiblichen Mücken der Gattung *Anopheles* ernähren sich durch Blutsaugen an Wirbeltieren und übertragen durch den Stich die Erreger von Malaria.

Mögliche Rückkehr der Malaria

Hier wird behauptet, die Malaria übertragende Anopheles-Mücke käme in unseren Breiten nicht vor. Das ist keineswegs der Fall. Dass zurzeit keine »hausgemachten« Malariafälle auftreten, liegt allein daran, dass die einheimischen Anopheles-Bestände frei von Plasmodien sind.

Erst in den 1930er Jahren sind die letzten Fälle von nicht eingeschleppter Malaria am Oberrhein aufgetreten. Die mit der Rheinregulierung einhergehende Austrocknung vormaliger ausgedehnter Feuchtgebiete verschlechterte Brutbedingungen und Fortpflanzungserfolg von *Anopheles*. Weniger Mücken – weniger Übertragungswege für die Plasmodien, dieser Kreislauf führte zum langsamen Verschwinden der Plasmodieninfektion bei *Anopheles* (aber nicht von *Anopheles* selbst) und damit der Malaria in unseren Breiten.

Das muss aber nicht so bleiben. Geplante Maßnahmen im Rahmen des Integrierten Rheinprogramms, mittels »Ökologischer Flutungen« in Poldern entlang des Oberrheins wieder feuchte Auwälder zu schaffen, können wie auch die globale Klimaerwärmung die Ausbreitung der *Anopheles* begünstigen. Falls die dann erwarteten größeren Bestände wieder durch einge-

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg, Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Andreas Merkert (stv. Hersteller), Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-729
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (0 21 1) 908 33 57, Fax (0 21 1) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (0 62 21) 91 26-770
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (0 62 21) 91 26-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr.Ulf Borgeest, Dr. Werner Gans, Dr. Andrea Kamphuis, Prime Ad! Translations AG, Dr. Maria Reményi, Dr. Frank Scholz.

Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-600, Fax (0 62 21) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser- und Bestellservice: Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. (0 21 1) 887-23 79, Fax (0 21 1) 887-23 99; verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0 21 1) 887-23 86, Fax (0 21 1) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, D-10117 Berlin, Tel. (0 30) 61 68 61 50, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Burchardstraße 17, D-20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 94, Fax (0 40) 33 90 90; Düsseldorf: Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (0 21 1) 301 35-20 60, Fax (0 21 1) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Holger Schlitter, Eschersheimer Landstraße 50–54, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 24 24-45 34, Fax (0 69) 24 24-45 55; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, D-70173 Stuttgart, Tel. (0 71 1) 22 475-40, Fax (0 71 1) 22 475-49; München: Reinold Kassel, Bernd Schmetje, Josephspitalstraße 15, D-80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. (0 21 1) 887-23 87, Fax (0 21 1) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 24 vom 01.01.2003.

Gesamtherstellung:
Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen
© Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, D-69038 Heidelberg.
Kein Teil dieser Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder in eine von Datenverarbeitungsmaschinen verwendbare Form oder Sprache übertragen oder übersetzt werden. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.
ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält Beilagen von Wissenschaft Online, Rothacker, National Geographic Humanitas; und Helmholtz. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

schleppte Erreger infiziert werden, ist auch die Rückkehr der Malaria in unsere Breiten nicht auszuschließen.

Wilhelm Leppert, Schwanau

Als die Gallier Römer wurden

Februar 2003

Welcher Staat würde den Durchmarsch von 157 000 Menschen (nach Orosius – Dirk Krausse nimmt sogar 264 000 Auswandernde an!) samt Vieh und aller Habe nicht als aggressiven Akt ansehen? Cäsar wehrte die Helvetier, die mit militärischer Gewalt einen Durchmarsch erzwingen wollten, ab – ist das so verwerflich? Später wurden die Römer von den Häduern, ihren Bundesgenossen, zu Hilfe gerufen. Hätte Cäsar das Ersuchen zurückweisen müssen?

Die Zahl von 264 000 Auswandernden ist übrigens seit langem suspekt: Römische Zahlzeichen wurden beim Abschreiben leicht verfälscht, und Orosius' Zahlangabe ist wahrscheinlicher, weil sie die niedrigere ist, aber auch deshalb, weil dann, wenn 110 000 Helvetier in ihr Gebiet zurückkehrten, vielleicht 20 000 auf dem Zug umkamen. Dass Cäsar in nur zwei Schlachten 154 000 Helvetier niedergemetzelt haben soll, ist völlig unglaubwürdig; in der Schlacht bei Cannae, einer der verlustreichsten der ganzen Antike, kamen 40 000 Römer um.

Dr. Walter Bloch, Solothurn, Schweiz

Antwort des Autors:

Die Praxis, Caesars Angaben zur Bevölkerungszahl keltischer oder germanischer Stämme grundsätzlich als übertrieben abzuwerten, ist unter Historikern weit verbreitet. Sie mutet aber ihrerseits suspekt an, wenn andere Angaben als glaubwürdig gelten, die ins eigene wissenschaftliche Konzept passen.

Nach militärischer Gewalt brachten die Römer aber auch ihre Kultur in die eroberten Gebiete.

Zum letzten Argument ist anzumerken, dass Cäsars Krieg gegen die Helvetier eben keine Feldschlacht zwischen zwei professionell ausgebildeten Heeren war, sondern ein Vernichtungsfeldzug gegen »barbarische« Völker, gegen Kinder, Frauen und Alte.

Die Helvetier wurden auch nicht etwa beim Versuch getötet, das römische Reichsgebiet zu passieren. Cäsar griff »die Ahnungslosen und durch ihr Gepäck behinderten« (Bell. Gall. I,12) Menschen beim Übergang über die Saône, mitten im damals noch unbesetzten Gallien an und ließ in dieser ersten »Schlacht« ein Viertel der Helvetier massakrieren. An dieses Gemetzel schloss sich eine mehrwöchige Verfolgung der nach Westen fliehenden Helvetier durch die römische Armee an.

Dirk Krausse

Die Klonbabys der Raelianer

Kommentar, Februar 2003

Herr Groß stellt fest, dass die schleichende Anpassung der Moralvorstellung an das technisch Mögliche bisher immer denen Recht gegeben hat, die der Fortpflanzung so gut wie möglich nachhelfen wollen, womit angedeutet wird, dass das wohl auch beim Klonen der Fall sein wird. Bezüglich des therapeutischen Klonens stimme ich ihm zu: Sofern erfolgreich, dürfte das Embryonenschutzgesetz rasch sang- und klanglos kassiert werden.

Anders liegt die Sachlage beim reproduktiven Klonen. Hier wird doch eine der wichtigsten Erfindungen der Evolution des Lebendigen, die Sexualität, konterkariert. Durch die Vereinigung der väterlichen und mütterlichen Gene kommt eine ständig neue Durchmischung und Neukombination der Erbinformationen in Gang. So werden Neugeborene auch bei Änderung der Umweltbedingungen eine Überlebenschance haben. Reproduktives Klonen dagegen führt zur Konstanz der Erbanlagen. In größerem Umfang sind die Folgen problematisch; denn zum einen gibt es keinen optimal angepassten Typ, zum andern kann niemand die künftigen Änderungen der Umweltbedingungen voraussagen.

Darf man etwas versuchen, das man auf Grund unseres Wissens als verhängnisvoll erkennen kann?

Dr. W. Jerg Hönes, Upfingen

CHRISTOPH HAUSSNER

Heißer Dampf aus kalter Flamme

Wissenschaft im Unternehmen, Januar 2003

So lobenswert hochgradig energieeffiziente Kraft-Wärme-Maschinen mit kompakten Baumaßen und geringem Schadstoffausstoß auch sein mögen: Es handelt sich bei der beschriebenen »Zero Emission Engine« um eine Verbrennungsmaschine, die fossile Energieträger nutzt. In Anbetracht des zunehmenden Treibhauseffekts und der damit verbundenen globalen Klimaveränderung darf Kohlendioxid als Schadstoff nicht länger vernachlässigt werden. Somit spiegelt die Bezeichnung »Zero Emission Engine« falsche Tatsachen vor. Selbst bei einer optimalen Verbrennung von Erdgas entstehen aus 1 kg Methan 2,25 kg CO_2. Hierbei gleich von Null-Emission zu sprechen halte ich für reichlich übertrieben.

Selbst beim Einsatz von Rapsöl als »nachwachsendem« Energieträger wird in einer Gesamtbilanz noch CO_2 freigesetzt. Denn auch wenn Raps während des Wachstums etwa so viel CO_2 aufnimmt, wie bei der Verbrennung von Rapsöl entsteht, dürfen Emissionen während des Produktionsprozesses und des Transports von Rapsöl nicht übersehen werden. Ich begrüße zwar die Entwicklung derartig optimierter Maschinen, aber bei der Namensgebung sollte man auch ehrlich sein. Daher ist die Bezeichnung »Steam-Cell« der Weiterentwicklung wohl die bessere Wahl als »Zero Emission Engine«.

Christoph Schaefer, Berlin

MIKROBIOLOGIE

Bakterien mit Thermometer

Einzeller sind oft nur in einem engen Temperaturbereich aktiv. Aber wie merken sie, wie warm es ist? Bei bestimmten Bakterien ist ein zentrales Steuer-Gen mit einem temperaturempfindlichen Riegel versehen: einer molekularen Haarnadel, die sich in der Wärme öffnet.

Von Joachim Eiding

Manche Bakterien sind allgegenwärtig. Zu diesen Allerwelts-Mikroben zählen insbesondere auch die so genannten Listerien. In Lebensmitteln wie Frischwurst, Seefisch und Rohmilch vermehren sich die stäbchenförmigen Erreger besonders gut und gelangen beim Verzehr der befallenen Produkte in den menschlichen Körper. Im Normalfall stellen sie für einen gesunden Menschen kein Problem dar: Fress- und T-Zellen des Immunsystems vernichten die Invasoren. Gefährdet sind jedoch schwangere Frauen und Föten, da Listerien die Fähigkeit haben, in die Plazenta einzudringen.

Auch Kleinkinder und Menschen mit geschwächter Abwehr wie frisch Operierte, Aids- oder Krebspatienten und Diabetiker können an einer Listeriose erkranken, die häufig einen schweren Verlauf nimmt. Zunächst zeigen sich grippeähnliche Symptome wie Fieber und Durchfall. Im akuten Stadium kann eine Blutvergiftung oder Hirnhautentzündung folgen. Zwar lässt sich die Listeriose mit Antibiotika behandeln. Trotzdem führt sie immer noch in dreißig Prozent der Fälle zum Tode.

Listerien dringen gewöhnlich über die Darmschleimhaut in den Körper ein. Dabei werden sie ähnlich wie Viren über Einstülpungen der Membran in die Zelle aufgenommen und verbergen sich dort vor dem Immunsystem. Zur Fortbewegung nutzen die Invasoren das natürliche Zellgerüst mit seinen hauchdünnen Actin-Fäden. Treffen sie auf die Zellmembran, bilden sie dort fingerförmige Ausstülpungen, die von der Nachbarzelle umschlossen und verschlungen werden. Auf diese Weise schaffen es die Erreger, von Zelle zu Zelle zu wandern, ohne den intrazellulären Raum passieren zu müssen. Für Antikörper bleiben sie daher unangreifbar. Auch die Blut-Hirn-Schranke können sie so überwinden.

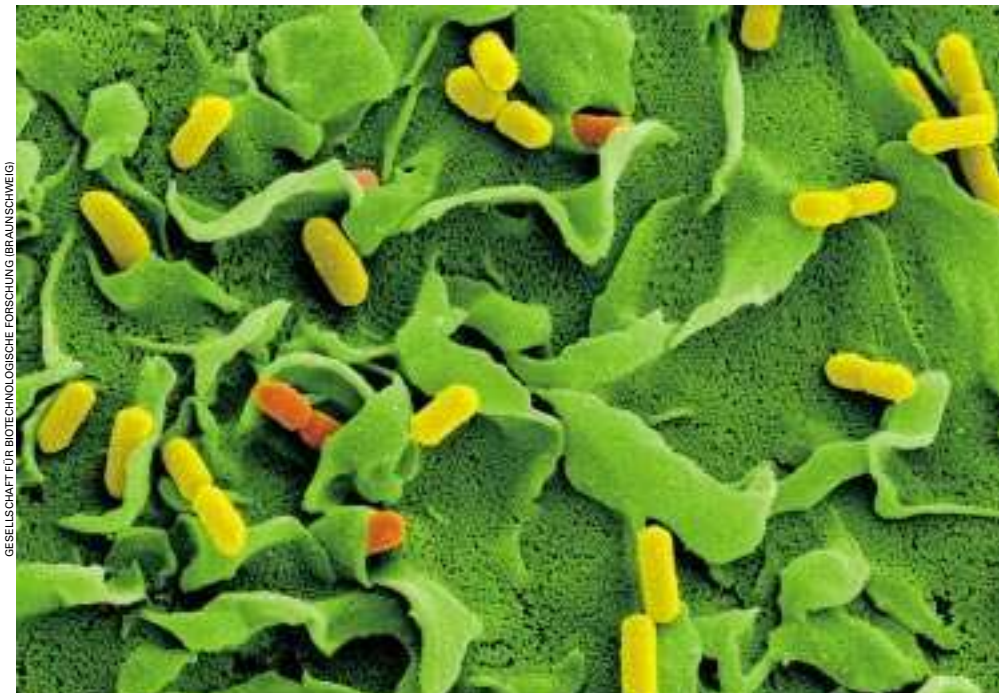
Nur bei Körpertemperatur infektiös

Obwohl Listerien bei Temperaturen zwischen 5 und 45 Grad Celsius leben können, hat sich gezeigt, dass sie nur in einem engen Temperaturbereich infektiös sind. Und dieser Bereich liegt ziemlich genau bei 37 Grad Celsius, der Körpertemperatur des Menschen. Der Grund für die freiwillige Zügelung der Aggressivität ist leicht einzusehen: Es macht für das Bakterium keinen Sinn und bedeutet nur eine überflüssige Energieverschwendung, die komplette Maschinerie für die Infektion dauerhaft in Betrieb zu halten; vielmehr verharrt es so lange in einer Art Schongang, bis die richtige Umgebungstemperatur signalisiert, dass ein geeigneter Wirt vorliegt.

Aber wie funktioniert der Temperatursensor? Seine molekulare Basis blieb lange ein hartnäckiges Rätsel. Nun aber fand eine Forschergruppe um Jörgen Johansson vom Pariser Pasteur-Institut die überraschende Antwort: Das Bakterium nutzt einen bisher unbekannten Mechanismus, bei dem sich eine mechanische Blockade in der Wärme auflöst *(Cell, Bd. 110, S. 551)*.

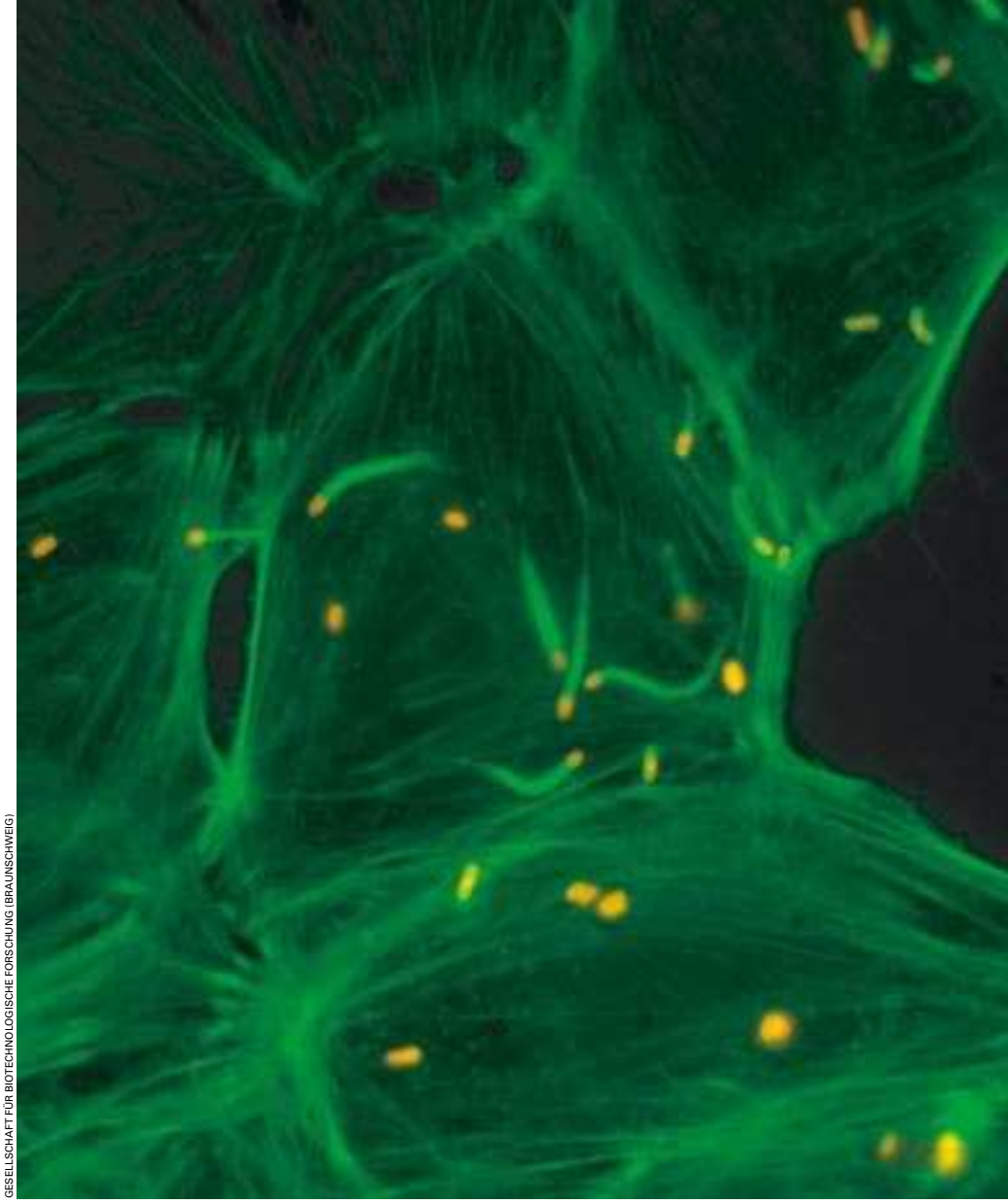
Wie alle Lebewesen erzeugen auch Listerien von einem Gen, dessen Proteinprodukt hergestellt werden soll, zunächst durch so genannte Transkription eine Arbeitskopie in Form einer Boten-RNA. Diese dient dann im zweiten Schritt den zellinternen Eiweißfabriken, den Ribosomen, als Anleitung zum korrekten Zusammenfügen von Aminosäuren zu dem gewünschten Protein – ein Vorgang, der als Translation (Übersetzung) bezeichnet wird. Auf diese Weise entsteht bei Listerien unter anderem auch der für die Infektion wichtige Eiweißstoff PrfA. Er aktiviert dann seinerseits jene Abschnitte des Erbguts, auf denen die Bauanleitung für die so genannten Invasine steht, die das Entern menschlicher Wirtszellen bewirken und das Immunsystem geschickt umgehen. So kommt die Infektion in Gang.

Unterhalb von 37 Grad Celsius wird jedoch nur wenig und bei 30 Grad Celsius gar kein PrfA gebildet. Als Grund dafür fanden die französischen Forscher nun heraus, dass die entsprechende Boten-RNA vor der eigentlichen Bauanleitung einen besonderen Abschnitt enthält, der selbst nicht übersetzt wird und daher die Bezeichnung UTR (*untranslated region*, nicht übersetzte Region) erhielt. Dieser Abschnitt liegt in der Kälte nicht als



GESELLSCHAFT FÜR BIOTECHNOLOGISCHE FORSCHUNG (BRAUNSCHWEIG)

Listerien können in Körperzellen eindringen. Ihre Haupt-Einfallspforte ist die Darmschleimhaut. Aber sie können auch – jedenfalls *in vitro* – dendritische Zellen des Immunsystems entern. Auf diesem angefärbten elektronenmikroskopischen Bild haben sich etliche Listerien (gelb) an die Außenmembran geheftet; andere (orange) sind gerade dabei, sich Einlass in die Zelle zu verschaffen.



GESELLSCHAFT FÜR BIOTECHNOLOGISCHE FORSCHUNG (BRAUNSCHWEIG)

Nach dem Eindringen in die Zelle nutzen Listerien Faserproteine des Zellgerüsts, um sich fortzubewegen. Auf dieser fluoreszenzmikroskopischen Aufnahme erscheinen die Bakterien rot, die Proteine dagegen grün.

offene Kette vor, sondern ist zu einer Haarnadel gefaltet. Dadurch verdeckt er jene Stelle des Botenmoleküls, die am Ribosom andockt. Die Erbinformation kann deshalb nicht in das Protein übersetzt werden. Erwärmt sich die Umgebung der Listerien allerdings auf 37 Grad Celsius, wird die Haarnadelstruktur instabil und löst sich auf. Dabei gibt sie die Anlegestelle für die Ribosomen frei: Die Herstellung von PrfA und der Invasine kann beginnen.

Dass die Faltung der UTR-Sequenz wirklich als Temperatursensor dient, bewies das Team um Johansson mit verschiedenen Untersuchungen. Zunächst einmal zeigte es, dass in der Kälte genauso viel Boten-RNA gebildet wird wie in der Wärme, die Hemmung also nicht schon den Transkriptionsprozess betrifft.

Einen entscheidenden Hinweis lieferte dann die Gel-Elektrophorese. Dabei ließen die Forscher die RNA-Moleküle bei 30 und bei 37 Grad Celsius durch ein feinporiges Gel wandern. Das Ergebnis war aufschlussreich: Die Wanderungsgeschwindigkeit lag bei der tiefen Temperatur deutlich höher als in der Wärme. Demnach haben die Moleküle in der Kälte eine kompaktere Struktur, die leichter durch die Poren des Gels schlüpft.

Daraufhin ließen die Forscher von einem Computerprogramm anhand der Zusammensetzung der UTR-Sequenz deren wahrscheinliche räumliche Gestalt bei tiefen Temperaturen errechnen. Dabei kam heraus, dass die innermolekularen Wechselwirkungen so stark sind, dass sich die Boten-RNA, die normalerweise einen losen Faden bildet, in der Kälte zu einer haarnadelförmigen Schleife zusammenlegt, welche die Andockstelle für die Ribosomen blockiert.

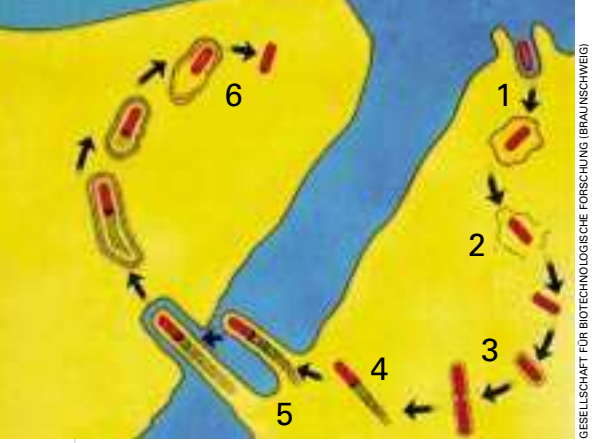
Mit demselben Programm ermittelten die Wissenschaftler sodann, welche Mutationen diese Sekundärstruktur destabilisieren sollten. Und als sie die natürliche Boten-RNA entsprechend abwandelten, sahen sie ihre Vermutung bestätigt: Die modifizierten Moleküle hatten die Fähigkeit zum Temperaturmessen eingebüßt; sie lagen auch bei 30 Grad Celsius schon als offene Ketten vor, die das Gel genauso langsam durchquerten wie die normale Boten-RNA bei 37 Grad Celsius. In Einklang damit entfalteten Listerien, denen das mutierte *PrfA*-Gen eingepflanzt wurde, in der Kälte bereits ihre volle Virulenz.

Universeller Wärmefühler

Als Nächstes fragten sich die Forscher nun, ob der Thermosensor auch in anderen Einzellern funktioniert. Sie übertrugen das *PrfA*-Gen deshalb in das bekannte und gut untersuchte Bakterium *Escherichia coli*, das im menschlichen Darm lebt. Tatsächlich entstand auch dort erst bei 37 Grad Celsius das zugehörige Protein. Der gelungene Transfer ist umso bemerkenswerter, als sich *E. coli* grundlegend von den Listerien unterscheidet. Während diese grampositiv sind, gehört es zu den gramnegativen Bakterien. Der von dem dänischen Arzt Hans Christian Gram im Jahre 1884 entwickelte Anfärbetest unterteilt die Mikroben in zwei große Gruppen, deren Zellwand völlig anders zusammengesetzt ist.

Nach dieser erfolgreichen Übertragung lag es nahe zu prüfen, ob sich der Temperatursensor vielleicht auch in andere Gene einbauen lässt. Für diesen Test wählten die Wissenschaftler das grün fluoreszierende Protein (GFP) – ein gebräuchlicher Marker, der ursprünglich aus einer Qualle stammt. Überträgt man das *gfp*-Gen auf *E. coli*, so leuchtet das Bakterium auch in der Kälte bei Bestrahlung mit UV-Licht grün auf: ein Beweis, dass es das fluoreszierende Protein produziert.

Mit sehr viel Geschick und Raffinesse fügten die Pariser Wissenschaftler nun in das normale *gfp*-Gen einen zusätzlichen Abschnitt ein, welcher der UTR-Region aus der Boten-RNA des PrfA-Proteins von Listerien entspricht. Und wieder hatten sie Erfolg: Die Bakterien mit dem derart modifizierten *gfp*-Gen leuchteten erst bei 37 Grad Celsius grün auf. Demnach ▷



GESELLSCHAFT FÜR BIOTECHNOLOGISCHE FORSCHUNG (BRAUNSCHWEIG)

Listerien werden durch Einstülpung der Außenmembran (Endocytose) in Wirtszellen aufgenommen (1). Nach dem Auflösen der sie umgebenden Blase (2) vermehren sie sich im Zellplasma (3). Mit dem Faserprotein Actin bilden sie Schweife zur Fortbewegung (4). An der Zellmembran erzeugen sie fingerähnliche Ausstülpungen (5), die von Nachbarzellen verschluckt werden. So können sie sich im Gewebe ausbreiten, ohne die schützende Wirtszelle verlassen zu müssen (6).

▷ bildet der Thermosensor auch hier in der Boten-RNA bei tiefen Temperaturen eine Haarnadelstruktur, welche die Andockstelle für das Ribosom bedeckt und sich erst in der Wärme auflöst.

Welche praktische Bedeutung haben nun diese neuen Erkenntnisse? Zwar liefern sie keine unmittelbaren Ansätze für eine bessere Bekämpfung der Listerien. Doch eröffnet der ungewöhnliche Thermosensor und vor allem seine Übertragbarkeit auf andere Gene viele interessante Möglichkeiten. »Ich glaube, es ist angemessen, von einem bedeutenden Fortschritt zu sprechen«, meint denn auch der Mikrobiologe Jon Goguen von der Universität von Massachusetts in Worcester. So kann man künftig – zumindest im Prinzip – beliebige Proteine in Bakterien temperaturabhängig herstellen lassen.

Für die Grundlagenforscher sind das faszinierende Aussichten – ermöglicht es doch, den genauen Zeitpunkt für die Synthese eines Proteins über die Temperatur zu steuern. Aber auch industriell dienen Bakterien schon in großem Maßstab als »Fabriken« für Enzyme oder andere medizinisch bedeutsame Substanzen. Hier kann man sich ebenfalls sinnvolle Einsatzmöglichkeiten für einen Wärmeschalter vorstellen. Johanssons Gruppe hat ihn jedenfalls vorsorglich schon einmal zum Patent angemeldet. ◁

Joachim Eiding ist promovierter Chemiker und Wissenschaftsjournalist in München.

ARCHÄOLOGIE

Die Schrift der Maya – von den Olmeken erfunden?

Wer waren die ersten Amerikaner, die lesen und schreiben konnten? Offenbar die für ihre steinernen Kolossalköpfe berühmten Olmeken. Auf ihrem einstigen Territorium fanden sich kürzlich Artefakte mit eingravierten Zeichen nach Art der späteren Maya-Hieroglyphen.

Von Erik Stokstad

Ein relativ unbedeutender Herrscher aus dem heutigen Guatemala errang 738 n. Chr. einen überraschenden Sieg: »Cauac Himmel« aus Quirigua nahm einen als »18 Kaninchen« bekannten mächtigen König gefangen, enthauptete ihn und überrannte Copán, eine der größten Städte im Maya-Reich. Dieses Ereignis, das auf zahlreichen steinernen Monumenten in Quirigua niedergeschrieben ist, markiert nur eine Episode in der umfangreichen Geschichte des berühmten mittelamerikanischen Volkes, die über sieben Jahrhunderte in Inschriften festgehalten wurde. Aber trotz der großen Erfolge bei der Entzifferung der Maya-Hieroglyphen blieb der Ursprung dieser hoch entwickelten Zivilisation mit ihrem heiligen Kalender und ihrer Schrift ein Rätsel.

Ging sie aus der Kultur der benachbarten Olmeken hervor, oder hatte sie mehrere Wurzeln bei verschiedenen frühen mittelamerikanischen Völkern? Die spärlichen Funde aus der Zeit vor den Maya gaben darüber bisher keine klare Auskunft. Zwei 1997/98 entdeckte, sehr alte Objekte, die jetzt ausgewertet und gedeutet wurden, könnten die Archäologen der Antwort jedoch näher bringen: ein zylindrisches Siegel und Fragmente einer Steinplakette, die so genannte Glyphen enthalten. Datiert auf etwa 650 v. Chr., sind sie wohl die ältesten schriftlichen Zeugnisse aus Amerika. Mary Pohl von der Florida State University in Talahassee und ihre Kollegen glauben, dass die Glyphe auf dem Siegel einen König und ein Datum bezeichnet. Damit schlägt sie eine überraschende Brücke zu späteren Inschriften der Maya, in deren Mittelpunkt gleichfalls Herrscherfiguren und kalendarische Angaben stehen.

Für viele Archäologen verstärkt diese Entdeckung zusammen mit neuen Funden aus älteren olmekischen Stätten den Eindruck, dass die Kultur der Olmeken eine Art Mutterboden für die späteren Zivilisationen der Azteken und Maya bildete. »In seiner Blütezeit stand das Olmeken-Reich einzig dar«, meint Michael Coe von der Yale-Universität in New Haven. »Hier wurde alles erfunden.« Die neuen Glyphen würden diese seit langem geäußerte Vermutung mit harten Fakten untermauern. »Dies ist die älteste Schrift«, sagt Richard Diehl von der Universität von Alabama in Tuscaloosa. »Sie ist Vater und Mutter aller späteren mittelamerikanischen Schriftsysteme.«

Andere Experten werten die neuen Artefakte dagegen als zu bruchstückhaft, um die alte Frage nach dem Einfluss der Olmeken oder dem Ursprung der Schrift in Mittelamerika definitiv zu beantworten. Einige bezweifeln das Alter der Stücke; andere sind skeptisch, ob die Glyphen die strenge Definition von Schrift erfüllen. Diejenigen Archäologen, in deren Augen die Olmeken-Kultur allenfalls eines von mehreren Fundamenten für die zivilisatorischen Leistungen der Maya war, bleiben unbeeindruckt. »Wir sehen keinerlei olmekischen Einfluss auf die alten Kulturen Zentralmexikos«, betont der Archäologe David Grove von der Universität von Florida in Gainesville.

Die Welt der Olmeken

Doch gibt es seit langem Hinweise darauf, dass die berühmten Schöpfer der steinernen Kolossalköpfe auch zentrale Elemente der Maya-Kultur, inklusive der Schrift, entwickelten. Ihre großzügige Architektur und ihre monumentalen Skulpturen belegen jedenfalls, dass sie das erste Volk in Mittelamerika waren, bei dem sich große politische Macht in den Händen weniger konzentrierte. Zudem haben andere mittelamerikanische Regionen vom Vorgänger jener Sprache, die heute im einstigen olmekischen Kernland am Isthmus von Tehuantepec gespro- ▷

MARY POHL, FLORIDA STATE UNIVERSITY

Bei dem von einem Vogel gesprochenen Symbol auf diesem faustgroßen Rollsiegel aus der Olmekenzeit scheint es sich um die älteste Datumsangabe in Mittelamerika zu handeln. Vermutlich bezeichnet es den Geburtstag eines Königs.

▷ chen wird, offensichtlich Worte entlehnt, die das Schreiben und den rituellen 260-Tage-Kalender betreffen.

Handfeste Zeugnisse sind freilich rar. In der bedeutenden olmekischen Stadt La Venta, die im heutigen südlichen Mexiko an der Golfküste liegt, haben Forscher zwei Monumente mit einer Reihe von Glyphen ausgegraben. Aber ihr Alter ist unklar. Sie lassen sich vage auf die Spanne zwischen 600 und 400 v. Chr. datieren, sodass sie die Frage nach Ort und Zeitpunkt der Schrifterfindung nicht beantworten können.

Pohl und ihre Kollegen Kevin Pope von Geo Eco Arc Research in Aquasco (Maryland) sowie Christopher von Nagy von der Tulane-Universität in New Orleans (Louisiana) begannen 1997 bei dem kleineren Ort San Andrés etwa fünf Kilometer nordöstlich von La Venta zu graben. Dabei entdeckten sie stratifizierte Ablagerungen von Böden, Feuerstellen und Müllhaufen *(Science, 18. 5. 2001, S. 1370)*. Die abfallhaltigen Schichten bargen zwischen zahlreichen Keramikscherben eine echte Sensation: ein faustgroßes zylindrisches Siegel sowie zwei gravierte Grünsteinsplitter, kaum größer als ein Daumennagel. Das Alter dieser Stücke bestimmten die Forscher durch Radiokarbondatierung von Holzkohleresten in derselben Schicht auf 2650 Jahre.

Gewisse Besonderheiten der eingeritzten Muster lassen darauf schließen, dass sie für Wörter stehen. So sind auf dem einen Splitter zwei ovale Glyphen senkrecht übereinander angeordnet; damit könnten sie Teil eines Textes sein, der wie bei späteren Inschriften aus der Region in Spalten von oben nach unten verläuft. In den Zylinder ist dagegen nur eine einzelne Glyphe eingraviert – neben einem Vogelschnabel, aus dem zwei divergierende Linien hervorkommen. Pohl verweist auf spätere Inschriften außerhalb des olmekischen Kernlandes, bei denen von menschlichen Mündern solche Linien ausgehen. Sie werden daher als Sprechvoluten bezeichnet. Am Ende der Volute des Vogels befinden sich u-förmige Zeichen, wie sie in späteren mittelamerikanischen Inschriften häufig vorkommen.

Beredte Sprechblase

Die Sprechblase weist nach Pohl und anderen darauf hin, dass die Gravuren auf dem Zylinder mehr als kunstvolle Verzierungen sind. »Offenbar geben sie Worte oder Laute einer Sprache wieder«, erklärt Martha Macri, linguistische Anthropologin an der Universität von Kalifornien in Davis. Außerdem sind die Symbole nicht ikonografisch, sehen also nicht nach dem aus, was sie bedeuten. Mithin müssen sie gelernt werden, und »das ist eines der Kennzeichen von Schrift«, betont Macri.

Die Glyphe auf dem Zylinder zeigt ein U in einem Oval neben drei kleinen Kreisen. Damit ähnelt sie einem bekannten Maya-Symbol mit drei Punkten namens »3 Ajaw«, das ein Datum bezeichnet. »Ich glaube, das Oval mit dem U ist definitiv das Tageszeichen Ajaw«, erklärt Coe. In Verbindung mit einer Zahl wäre es jedenfalls der älteste archäologische Hinweis auf den heiligen 260-Tage-Kalender der Maya.

In deren Schrift bedeutet »Ajaw« aber nicht nur Tag, sondern auch König. Folglich liest Pohl die Glyphe als den Namen »König 3 Ajaw« – was sinnvoll erscheint, da die Einwohner Mittelamerikas oft nach dem Tag ihrer Geburt benannt wurden. Das Siegel von San Andrés könnte dazu gedient haben, königliche Botschaften oder Besitztümer mit den Insignien des Herrschers zu versehen.

Aber einige Forscher ziehen die zeitliche Einordnung und die Bedeutung des Funds in Zweifel. Radiokarbondaten für so alte Objekte sind immer mit einer großen Unsicherheit behaftet; allein auf ihrer Basis lässt sich daher nur feststellen, dass die Glyphen von San Andrés zwischen 790 und 410 v. Chr. entstanden. Nach dem Keramikspezialisten der Gruppe, von Nagy, helfen allerdings stilistische Vergleiche der Tonscherben in der Schicht, dieses Intervall auf 700 bis 600 v. Chr. einzugrenzen.

Doch auch Pohls linguistische Argumente sind nicht wasserdicht. Wenn sie behauptet, dass eine »gesprochene« Glyphe einen Nachweis für Schrift darstellt, so legen Linguisten und Epigrafiker meist strengere Maßstäbe an. Sie erwarten Spalten oder Reihen von Glyphen mit einer Wortfolge und einer Syntax – weitaus mehr, als diese Fragmente liefern können. »Einige wenige isolierte Zeichen ... liegen deutlich unter den Mindestanforderungen an eine erste Schrift«, erklärt der Epigrafiker Stephen Houston von der Brigham-Young-Universität in Provo (Utah). »Zeigen Sie mir einen wirklichen Text mit sequenziellen Elementen, und ich werde mich eher überzeugen lassen.«

Dennoch sind sich viele Forscher darin einig, dass diese Fragmente, auch wenn sie keine voll entwickelte Schrift darstellen, zumindest den Weg dorthin dokumentieren. Pohl meint zum Beispiel, dass geordnete Reihen und Spalten vielleicht erst später entstanden. »Es liegt an der Grenze zwischen Ikonografie und Schrift«, pflichtet ihr der Archäologe Chris Poole von der Universität von Kentucky in Lexington bei.

Für Poole passt all das zu anderen Hinweisen, wonach die Olmeken »eine besondere Rolle ... bei der Entwicklung und Verbreitung von vielen für Mesoamerika bedeutsamen Kulturmerkmalen« ge-

Die vertikale Anordnung der Glyphen auf dem rechten dieser daumennagelgroßen Plättchen ähnelt der Schreibweise späterer Maya-Texte, in denen aufeinander folgende Schriftzeichen senkrecht übereinander stehen.

THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Das Olmekenreich mit seinen Hochburgen bei La Venta und San Lorenzo befand sich nordwestlich der späteren Maya-Region. Mutmaßliche Schriftzeugnisse aus der Vor-Maya-Zeit fanden sich auch in einer Zapoteken-Siedlung bei San José Mogote.

spielt haben. Er und andere sehen in neueren Daten den Beleg dafür, dass große Populationen und politische Strukturen zuerst bei den Olmeken entstanden.

So haben Ann Cyphers und ihre Kollegen von der Autonomen Nationaluniversität Mexikos in Mexiko-Stadt in den letzten zehn Jahren herausgefunden, dass das frühe olmekische Zentrum von San Lorenzo in Veracruz in seiner Blütezeit zwischen 1200 und 900 v. Chr. weitaus höher entwickelt war als bisher angenommen. Es beeindruckte nicht nur mit zahlreichen monumentalen Skulpturen von Menschen und Raubkatzen, sondern verfügte auch über einen Aquädukt, der Quellwasser herbeiführte, sowie über einen hundert Quadratmeter großen »Palast« mit Abflussrinnen aus Basalt. Nach Ansicht des Archäologen Kent Reilly von der Southwest Texas State University in San Marcos könnte er der Regierungssitz gewesen sein.

Eine Bestandsaufnahme von weiteren archäologischen Stätten im Umkreis von 800 Quadratkilometern deutet darauf hin, dass die Macht der Olmeken-Herrscher weit über die Hauptstadt hinausreichte. So fanden sich an einer strategisch günstigen Stelle am Zusammenfluss von zwei Flüssen steinerne Throne, die kleiner als die von San Lorenzo, aber auf ähnliche Art verziert waren. »So wie sich die Population auf regionale Siedlungen verteilte, gehen wir davon aus, dass es sich um einen beginnenden Staat handelte«, sagt Cyphers.

Multikulturelle Wurzeln

Trotz der offensichtlichen Konzentration politischer Macht bleiben die Meinungen zum Ausmaß des olmekischen Einflusses geteilt. Jene Forscher, die einen multikulturellen Ursprung der Maya-Zivilisation favorisieren, verweisen darauf, dass die Olmeken Keramikstile von anderen Völkern entlehnten und dass ein reger Handel mit Waren wie Werkzeugen aus Obsidian und Schmuckstücken aus Jade quer durch Mittelamerika existierte.

Grove beharrt jedenfalls darauf, dass es damals viele Kulturen gab. Die neu entdeckten Schriftfragmente reichen nicht aus, um Forscher wie ihn umzustimmen. Selbst wenn das Alter der Glyphen stimmt, bezweifelt Grove, dass die Gegend von La Venta deshalb auch der Ursprungsort der Schrift gewesen sein muss. »Meiner Meinung nach beweist das nicht, dass die Olmeken sie erfunden haben. Sie könnte irgendwo in dieser südlichen Region entstanden sein«, sagt er. Schließlich waren das Siegel und die Plakette leicht zu transportieren.

Zu guter Letzt gibt es Hinweise darauf, dass zur selben Zeit auch andere mesoamerikanische Kulturen mit der Schrift experimentierten. Joyce Marcus und Kent Flannery von der Universität von Michigan in Ann Arbor haben etwa 300 Kilometer von La Venta entfernt in San José Mogote ein Monument ausgegraben, das von den in der mexikanischen Provinz Oaxaca beheimateten Zapoteken geschaffen wurde und gleichfalls eine Glyphe trägt. Sie datieren es auf 600 bis 500 v. Chr. – eine Altersangabe, die Pohl und andere allerdings mit Skepsis betrachten.

Für den Archäologen Javier Urcid von der Brandeis University in Waltham (Massachusetts) stellt die Glyphe auf dem zapotekischen Monument einen Tagesnamen dar. Der Forscher hält sie folglich ebenso für ein Schriftzeichen wie die Gravuren auf der Grünsteinplakette von San Andrés. Seiner Meinung nach könnten beide Schriften unabhängig voneinander erfunden worden sein. »Selbst wenn die mittelamerikanische Schrift nur an einem einzigen Ort entstanden ist«, gibt Urcid zu bedenken, »halte ich es für unwahrscheinlich, dass wir ihn jemals finden werden.«

Wo auch immer die Ursprünge der Maya-Hieroglyphen lagen, begannen sie in den Jahrhunderten nach dem Auftreten dieser ersten Inschriften Stele um Stele zu füllen. Selbst eine Niederlage konnte die Schreiber nicht stoppen, zumindest nicht lange. So versuchte ein neuer Herrscher von Copán elf Jahre nach dem unrühmlichen Ende von »18 Kaninchen« die bitteren Erinnerungen mit einer großen Geschichte der Krieger-Herrscher seiner Stadt vergessen zu machen. Dabei schuf er den längsten bekannten hieroglyphischen Text aus der Neuen Welt. ◁

MARY POHL, FLORIDA STATE UNIVERSITY

Erik Stokstad ist Redakteur von ScienceNow.
Nachdruck in unautorisierter Übersetzung aus Science, Bd. 298, S. 1872. © 2002 AAAS

ATOMPHYSIK

Umordnung der Atomhülle in Zeitlupe

Veränderungen in der Elektronenhülle eines Atoms laufen in unvorstellbarem Tempo ab. Mit extrem kurzen Röntgenblitzen gelang es jetzt, das Auffüllen eines Loches in einer inneren Elektronenschale gleichsam in Zeitlupe zu verfolgen.

Von Markus Drescher

Ein Atom ist ein geordneter Mikrokosmos, in dem negativ geladene Elektronen, säuberlich aufgereiht in übereinander liegenden Schalen, einen positiven Kern umhüllen und dessen Ladung gerade kompensieren. Diese friedliche kleine Welt gerät aus den Fugen, wenn ein Photon (Lichtquant) ein Teilchen aus der Hülle schlägt. Für kurze Zeit ist das Gleichgewicht der Kräfte dann empfindlich gestört. Es kommt zu einem Gerangel unter den verbliebenen Elektronen: Sie arrangieren sich so lange um, bis eine neue stabile Anordnung hergestellt ist.

Solche Vorgänge spielen bei der Einwirkung ionisierender Strahlung auf Materie eine große Rolle, weshalb sich nicht nur Atomphysiker dafür interessieren. Sie sind allerdings nicht nur hochkomplex, sondern laufen auch extrem schnell ab. Deshalb gelang es bisher nicht, sie experimentell im Detail aufzuklären.

Ultrakurze Röntgenblitze

Sichtbares Licht kommt für solche Untersuchungen nicht in Frage. Erstens reichen die Energien optischer Photonen bestenfalls aus, um ein locker gebundenes Elektron im Außenbereich der Atomhülle in einen etwas energiereicheren Zustand anzuheben; mit einem stark vereinfachten Bild ausgedrückt, entfernen sie sich dadurch ein klein wenig weiter vom Kern, bleiben aber daran gebunden. Zweitens dauern solche Lichtblitze viel zu lang: Aus fundamentalen physikalischen Gründen können sie nämlich nicht kürzer sein als die Schwingungsperiode der verwendeten Strahlung – und die beträgt bei Photonen aus dem sichtbaren Spektralbereich etwa zwei Femtosekunden (10^{-15} Sekunden). Das Rearrangement der Elektronen vollzieht sich aber bis zu tausendmal schneller: in einer Zeitspanne von Attosekunden (10^{-18} Sekunden).

Will man diesen Vorgang im Einzelnen verfolgen, benötigt man Pulse entsprechend kurzer Dauer. Die aber lassen sich nur mit Photonen im extremen Ultraviolett- oder Röntgenbereich erzeugen, die mehr als tausendmal kleinere Schwingungsperioden haben. Außerdem sind derart kurzwellige Lichtquanten energiereich genug, auch solche Elektronen, die sich auf inneren Schalen dicht am Kern befinden, aus der Atomhülle herauszuschlagen.

Seit Wilhelm Conrad Röntgen 1895 seine »X-Strahlen« entdeckte, sind viele unterschiedliche Wege gefunden worden, sie zu erzeugen. Doch erst vor zwei Jahren gelang es einem Team von Physikern an der Universität Bielefeld und der Technischen Universität Wien, dem ich angehöre, eine Methode zu entwickeln, mit der sich einzelne Röntgenblitze von nur 650 Attosekunden Dauer herstellen und nachweisen lassen. Es handelt sich um die kürzesten bislang erzeugten elektromagnetischen Einzelpulse; selbst ultraschnelle moderne Mikroprozessoren brauchen für einen einzigen Taktzyklus eine Million Mal länger.

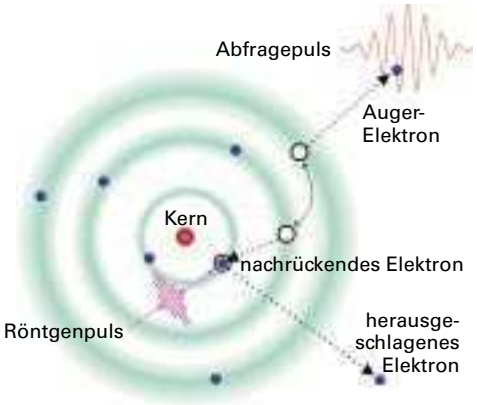
Der Trick besteht darin, sehr starke infrarote Laserpulse von ungefähr sieben Femtosekunden Dauer in ein Gas – beispielsweise Neon – zu fokussieren. Im Brennpunkt treten dabei Strahlungsintensitäten auf, die das Milliardenfache derjenigen auf der Sonnenoberfläche betragen. Die Gasatome werden dadurch ionisiert und die freigesetzten Elektronen im elektrischen Feld des Laserlichts auf hohe Geschwindigkeiten beschleunigt.

Wie winzige Geschosse rasen sie dann durch das Medium. Wenn sie dabei mit enormer Wucht erneut auf ein Gasatom prallen, entsteht ein Strahlungsblitz aus Photonen, die um ein Vielfaches kurzwelliger sind als das eingestrahlte Laserlicht: Ihre Energie erreicht bis zu einige hundert statt der rund 1,6 Elektronenvolt der ursprünglichen Laserquanten. Zugleich sind diese Pulse extrem kurz und dauern nur wenig mehr als eine halbe Femtosekunde.

Schnappschüsse der Energieverteilung

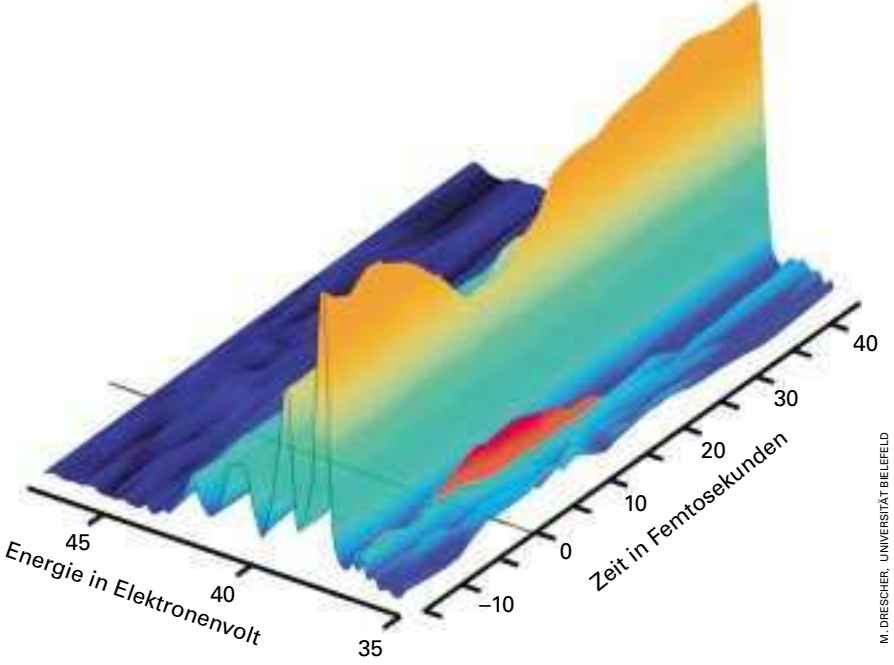
Die aus der Fotografie entlehnte Vorstellung, dass sich jede noch so schnelle Bewegung scharf abbilden lässt, wenn das verwendete Blitzlicht nur kurz genug aufflammt, ist griffig – aber in unserem Fall irreführend. Die Quantenmechanik lässt es nämlich nicht zu, den Ort eines Elementarteilchens, dessen Energie bekannt ist, durch Beobachtung präzise zu bestimmen. Wir werden also nie eine räumlich aufgelöste Zeitlupenaufnahme der Elektronenbewegung in der Atomhülle zu sehen bekommen.

Sehr wohl erlaubt ist es aber, Änderungen der Energieverteilung eines Teilchen-Ensembles mit beliebig hoher zeitlicher Auflösung zu verfolgen. Außer dem blitzartigen Anregungspuls, der ein Elektron aus der Atomhülle katapultiert, braucht man dafür freilich einen »Kameraverschluss«, der die Umordnung der Elektronen zu einem definierten späteren Zeitpunkt abfragt. Da mechanische Verschlüsse viel zu träge wären, dient zur Abfrage ein zweiter Blitz aus sichtbarem Licht, der mit einer gewissen Verzögerung auf den Röntgenpuls folgt.



Ein extrem kurzer Röntgenpuls im Bereich von Attosekunden (10^{-18} Sekunden) Dauer schlägt ein Elektron (blau) aus einer inneren Schale (grün) der Elektronenhülle. Ein äußeres Elektron füllt dieses Loch und überträgt die dabei frei werdende Energie auf ein so genanntes Auger-Elektron, das ebenfalls das Atom verlässt. Der Zeitverlauf dieser Reaktion wird mit einem zeitlich versetzten Laserpuls abgefragt.

M. DRESCHER, UNIVERSITÄT BIELEFELD



M. DRESCHER, UNIVERSITÄT BIELEFELD

Der Abfragepuls ändert die Bewegungsenergie der ausgesandten Auger-Elektronen. Dadurch erscheint im zeitaufgelösten Energiespektrum dieser Elektronen eine zusätzliche Linie (rot). Ihre Intensität hängt von der Verzögerung des Laserpulses gegenüber dem anregenden Röntgenpuls ab. Das Maximum dieser Linie zeigt daher, wie viele Femtosekunden nach der Erzeugung eines Lochs in der inneren Schale vergehen, bis ein Auger-Elektron ausgesandt wird.

Durch das Herausschlagen eines Elektrons aus der inneren Atomhülle entsteht zunächst ein »Loch«. Es verschwindet aber gleich wieder, weil ein weniger stark gebundenes Elektron aus einer äußeren Schale sofort auf den energetisch günstigeren Platz wechselt. Die dabei freigesetzte Energie wird auf ein weiteres Elektron übertragen, das als »Auger-Elektron« – benannt nach dem französischen Physiker Pierre Victor Auger (1899–1993) – mit einer charakteristischen Bewegungsenergie aus dem Atom entweicht. Dieser »Zerfall« folgt gemäß der Theorie einem universellen Gesetz, das den Prozentsatz von Atomen, die noch kein solches Auger-Elektron ausgesandt haben, als Funktion der Zeit beschreibt.

Meine Kollegen und ich konnten diese so genannte Zerfallsfunktion nun zum ersten Mal mit der gerade beschriebenen Anregungs- und Abfragemethode an Kryptonatomen messen. Dazu feuerten wir einen 900 Attosekunden langen Röntgenpuls in das Gas und schickten in unterschiedlichen Abständen einen infraroten Laserpuls von sieben Femtosekunden Dauer hinterher. Der Röntgenpuls setzte den oben geschilderten Zerfallsprozess in Gang, und der Laserpuls fragte ab, wann das Auger-Elektron entwich. Dieses tauscht nämlich, wenn bei seiner Aussendung ein starkes Lichtfeld anwesend ist, ▷

Energie mit ihm aus. Je nachdem ob das Wechselfeld in dem Moment gerade in die gleiche oder die entgegengesetzte Richtung zeigt, in die sich das Teilchen bewegt, wird es beschleunigt oder abgebremst. So kann man aus Vorzeichen und Ausmaß der Energieänderung auf den Moment der Aussendung des Auger-Elektrons relativ zum Lichtpuls schließen. Der Zeitabstand von Röntgen- und Laserpuls lässt sich sehr genau einstellen, sodass eine Sequenz von Energiespektren bei schrittweise ansteigender Verzögerung eine Art energetischer Zeitlupenaufnahme des Zerfallsvorgangs ergibt.

Da es sich um ein Quantenphänomen handelt, erfolgt die Energieänderung des Auger-Elektrons allerdings nicht kontinuierlich, sondern stufenweise – in Quanten der Energie des Laserphotons von 1,6 Elektronenvolt. Dadurch erscheint im Energiespektrum der ausgesandten Auger-Elektronen vorübergehend eine zusätzliche Linie, die um 1,6 Elektronenvolt verschoben ist. Gleichzeitig schwächt sich die ursprüngliche Auger-Spektrallinie ab. Während der Abstand zwischen Röntgen- und Laserpuls vergrößert wird, nimmt die Intensität der neuen Linie zunächst zu und verringert sich dann wieder. Interessant ist, wann sie ihr Maximum erreicht. Denn daraus lässt sich die Halbwertszeit des untersuchten Auger-Zerfalls bestimmen. Wie sich zeigte, ist sie sehr kurz: Sie beträgt nur 5,5 ± 0,7 Femtosekunden.

Mit unserem Experiment konnte dieser Wert erstmals für einen Auger-Zerfall direkt gemessen werden. Der Theorie zufolge sollten viele ähnliche Prozesse in anderen Atomen sogar noch schneller ablaufen und schon nach wenigen hundert Attosekunden abgeschlossen sein. Auch sie lassen sich mit der neuen Methode im Prinzip verfolgen. Die dafür nötigen stärkeren Lasersysteme werden derzeit entwickelt. Sie liefern energiereichere Röntgenphotonen und machen so noch tiefere Schalen der Elektronenhülle zugänglich. Zugleich steigt die Zeitauflösung: Die durch die Schwingungsperiode definierte prinzipielle Grenze beträgt bei den härteren Röntgenphotonen nur noch zehn Attosekunden.

Markus Drescher ist Physik-Dozent an der Universität Bielefeld. Sein Arbeitsschwerpunkt sind zeitabhängige Phänomene bei der Anregung von Atomen, Molekülen und Oberflächen mit ionisierenden Lichtpulsen.

KLEINWUCHS

Von Knochen und Knorpeln

Bei der häufigsten Form des Kleinwuchses ist die Umwandlung von Knorpel- in Knochenmasse gestört. Neue Einblicke in die Steuerung dieses Vorgangs wecken nun erstmals Hoffnung auf eine wirksame Behandlung des genetischen Defekts.

Von Imke Ortmann

Arme und Beine sind stark verkürzt und leicht gekrümmt. Der Kopf ist relativ groß, die Stirn vorgewölbt und die Nasenwurzel eingedrückt. Einzig der Rumpf hat fast normale Maße. Ein solches Kind wird ausgewachsen nur eine Größe von ungefähr 1,30 Metern erreichen und mit einer ziemlich unproportionierten Körperfigur leben müssen. Es leidet an Achondroplasie, der häufigsten Form des skelettären Kleinwuchses beim Menschen. Etwa eines unter 10 000 Neugeborenen ist davon betroffen.

Der medizinische Fachbegriff bedeutet übersetzt »fehlende Knorpelbildung« und weist damit auf die Ursache der Knochenmissbildung hin. Diese ist freilich noch keineswegs im Detail geklärt. Außerdem gibt es bisher kaum Möglichkeiten, die Achondroplasie zu behandeln, weil sie – im Unterschied zu anderen Formen des Kleinwuchses – so gut wie nicht

MPI FÜR MOLEKULARE GENETIK, BERLIN

auf Wachstumshormone anspricht. Umso wertvoller sind neue Erkenntnisse am Max-Planck-Institut für molekulare Genetik in Berlin: Vertiefte Einsichten in die molekularen Regulationsmechanismen der menschlichen Knochenentwicklung liefern erstmals Ansätze zu Erfolg versprechenden Therapiemöglichkeiten.

Bei der Achondroplasie sind die langen Knochen der Extremitäten stark verkürzt. Diese »Röhrenknochen« bilden sich während der Entwicklung eines Embryos in einem komplizierten Differenzierungsprozess. Dabei verdichten sich zunächst noch unspezialisierte Zellen und wandeln sich in so genannte Chondrozyten um, die Knorpelsubstanz produzieren. Während diese sich anfangs noch vermehren, stellen sie später, ausgehend von der Mitte der Knochenanlage, die Zellteilung ein und differenzieren sich zu den charakteristisch aufgeblähten Zellen des so genannten Blasenknorpels. Dieser umgibt sich strumpfartig mit einer Knochenmanschette, durch die Blutgefäße ins Innere der Skelettanlage eindringen und Knochen bildende Osteoblasten sowie Knochen abbauende Osteoklasten einschleusen. Unter deren Einfluss wird der Knorpel schließlich nach und nach durch Knochen und Knochenmark ersetzt.

Die Rolle der Wachstumsfugen

Das Längenwachstum eines Röhrenknochens hängt allein von der Teilung und Differenzierung der Knorpelzellen ab. Auch nach der Geburt bleibt an beiden Enden des Knochenschafts eine Knorpelregion erhalten: die so genannte Wachstumsfuge. An ihr teilen sich die Knorpelzellen kontinuierlich und entwickeln sich zum Blasenknorpel. Da dieser fortlaufend verknöchert, müssen für ein korrektes Längenwachstum Teilung und Differenzierung der Chondrozyten genauestens kontrolliert werden. Nach Ende der Pubertät wandelt sich der Knorpel in den Wachstumsfugen vollständig in Knochenmasse um, womit das Längenwachstum dauerhaft zum Erliegen kommt.

Eine Maus mit Achondroplasie – einer Störung des Knochenwachstums – hat gegenüber einem normalen Tier stark verkürzte Gliedmaßen. Der Kleinwuchs wurde durch eine Mutation der Andockstelle für den Wachstumsfaktor FGF *(Fibroblast Growth Factor)* künstlich hervorgerufen.

Bei der Achondroplasie aber setzt die Verknöcherung der Wachstumsfugen zu früh ein. Durch eine Mutation, bei der nur ein einziger »Buchstabe« in der Erbinformation verändert ist, sind Teilung und Differenzierung der Chondrozyten derart gestört, dass nicht genügend Knorpelsubstanz nachgebildet wird.

Schon 1994 konnte das verantwortliche Gen identifiziert werden. Es trägt die Bauanleitung für einen Rezeptor: ein Protein in der Wand der Chondrozyten, an das sich nur ganz bestimmte Stoffe anlagern können. In diesem Fall sind das die so genannten *Fibroblast Growth Factors* (FGFs). Diese Wachstumsfaktoren – Proteine mit hormonähnlicher Wirkung – fördern oder hemmen die Teilung und Differenzierung von Zellen. Den Rezeptor kann man sich dabei als Schalter vorstellen: Bei Anlagerung von FGFs wird er auf »an« gestellt; ohne sie steht er auf »aus«. Durch die Genmutation ist er so verändert, dass er auch ohne FGF ständig eingeschaltet bleibt.

Zur genaueren Erforschung der Achondroplasie entwickelten Forscher geeignete »Mausmodelle«. Dazu brachten sie per Gentransfer mutierte FGF-Rezeptoren in die Knochenanlage von Mäuse-Embryonen ein. Die daraus heranwachsenden Nager hatten wie Menschen mit Achondroplasie verkürzte Gliedmaßen und die ungewöhnliche Kopfform. Betrachtet man ihre Knorpelregion, zeigt sich, dass die Zone der sich teilenden Chondrozyten und der Bereich des Blasenknorpels verkleinert sind. Allerdings gelang es an den Mausmodellen nicht, entscheidende neue Aufschlüsse über die molekularen Hintergründe dieser Art von Zwergwuchs zu gewinnen oder eine wirksame Behandlung zu entwickeln.

Neue Hoffnung bringen jetzt die Ergebnisse der Arbeitsgruppe von Andrea Vortkamp am Berliner Max-Planck-Institut. Das Team entwickelte eine Methode, die Knorpel- und Knochenanlagen der Extremitäten von Mausembryonen in Kultur zu halten. Dabei liegen die Zellen nicht einzeln, sondern als intaktes Gewebe vor, was den Bedingungen in einer lebenden Maus recht nahe kommt. Zugleich sind Experimente viel einfacher durchführbar als am vollständigen Tier, weil man die Gewebekulturen direkt mit den Wachstumsfaktoren behandeln und die anschließende Entwicklung der Zellen untersuchen kann. Dafür wird das Gewebe geschnitten, angefärbt und zu- ▷

Im Juni bei wissenschaft-online

wissenschaft-online

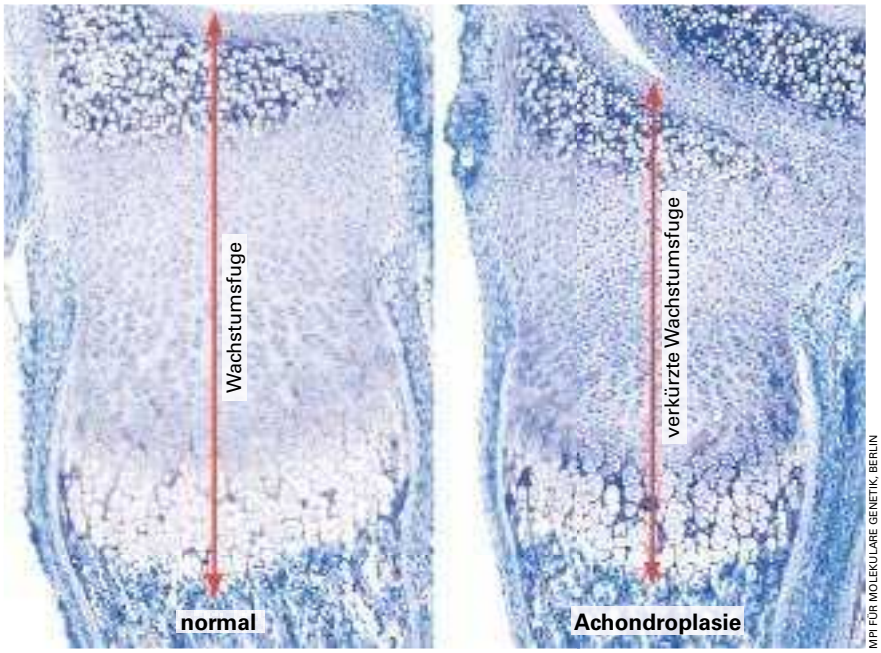
Die Physik ist ein weites Feld, sie reicht von den kleinsten Strukturen bis hin zu wahrhaft kosmischen Dimensionen. Viele Phänomene an den Grenzen dieser Wissenschaft verlangen dem Vorstellungsvermögen einiges ab. Aber gerade das macht den Reiz der Physik aus.

2003 highlights der physik

Eine Wissenschaft, deren Vielfalt die Deutsche Physikalische Gesellschaft mit einem mehrtägigen Festival in Dresden präsentiert. wissenschaft-online ist bei diesen Highlights der Physik dabei. Schon im Vorfeld berichten wir über die Themen der Veranstaltung. Aktuelles und alles Wissenswerte über die Physik und ihre Highlights finden Sie unter: www.wissenschaft-online.de/physik

Das Programm der Veranstaltung, die teilweise von den Fernsehmoderatoren Ranga Yogeshwar und Peter Lustig gestaltet wird, verspricht viel Kurzweil. wissenschaft-online und Spektrum der Wissenschaft werden vor Ort informieren und bei Gewinnspielen attraktive Preise verlosen.

www.wissenschaft-online.de



MPI FÜR MOLEKULARE GENETIK, BERLIN

Die verkürzten Röhrenknochen bei Achondroplasie (rechts) entstehen dadurch, dass bestimmte Knorpelzellen – so genannte Chondrozyten – sich zu wenig teilen und zu schnell zu Knochenzellen differenzieren. Die Wachstumsfuge an den Enden der Knochen ist dadurch schmaler als im Normalfall.

▷ nächst einmal auf Veränderungen in der Zellgröße oder der Zusammensetzung von verschiedenen Zellzonen untersucht. Wichtiger ist aber die Analyse, welche Gene in den verschiedenen Regionen des Knorpels oder in bestimmten Zellverbänden abgelesen werden. Der Vergleich von unbehandelten mit behandelten Geweben ermöglicht dann recht einfach Aufschlüsse über Veränderungen.

Mit diesem Modellsystem konnten die Berliner Forscher bestätigen, dass FGFs die Vermehrung der Knorpelzellen in der Wachstumsfuge hemmen. Dagegen widerlegten sie eine andere Annahme: Aus der verkleinerten Region des Blasenknorpels hatte man geschlossen, FGFs würden auch die Differenzierung von Knorpelzellen zur Knochensubstanz verzögern. Das Gegenteil ist jedoch der Fall: Wie sich nun zeigte, beschleunigen sie den Prozess sogar. Damit wirken sie gleich doppelt negativ auf das weitere Längenwachstum von Röhrenknochen.

Diese Erkenntnis verdankt das Team um Vortkamp einer Technik, mit der sich das Differenzierungsstadium von Knorpelzellen daran erkennen lässt, welche Gene gerade aktiv sind. Von angeschalteten Genen werden nämlich Blaupausen erzeugt – so genannte Boten-RNAs –, die dann an den Ribosomen die Herstellung der entsprechenden Proteine veranlassen. Die Anwesenheit der Boten-RNAs aber lässt sich daran erkennen, dass sie »komplementäre« Moleküle binden, die zuvor radioaktiv markiert worden waren. Diese Untersuchungen ergaben, dass nach Zugabe von FGF weniger Knorpelzellen in frühen und mehr in späten Differenzierungsstadien vorliegen. Die Verknöcherung wird also beschleunigt.

Neben FGF gibt es aber noch weitere Faktoren, die den Differenzierungsprozess der Knorpelzellen steuern. Dazu zählen die BMPs *(Bone Morphogenetic Proteins)*. Von ihnen ist schon seit längerem bekannt, dass sie bei zu hoher Konzentration ein übermäßiges Längenwachstum auslösen, also zu übergroßen Extremitäten führen. Sind dagegen bestimmte BMP-Gene defekt, kommt es zur Verkürzung einzelner Skelett-Elemente.

Aus diesem Grund behandelten die Berliner Forscher die Gewebekultur auch mit BMPs. Das Ergebnis war eindeutig. Danach regulieren FGFs und BMPs unabhängig voneinander die gleichen Schritte, nämlich Vermehrung und Differenzierung des Knorpels – allerdings in entgegengesetzter Richtung. Im Unterschied zu FGF- erhöhen BMP-Signale die Teilungsrate der Knorpelzellen und verzögern deren Weiterentwicklung zum Blasenknorpel. Somit wirken sie doppelt positiv auf das Längenwachstum.

Ansatz für eine wirksame Therapie

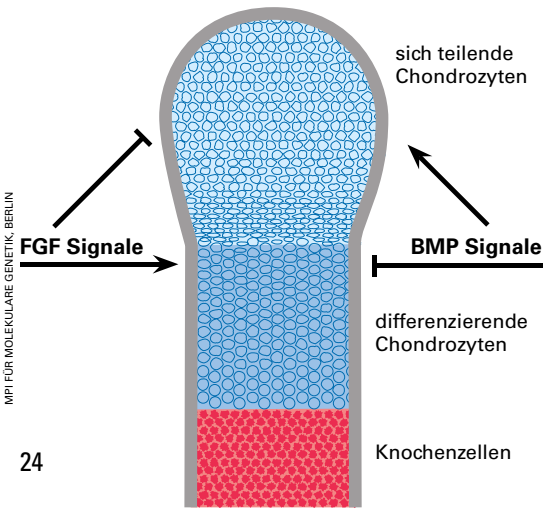
Es lag daher nahe, BMPs auf ihre therapeutische Wirkung bei Achondroplasie zu testen. Dazu brachte das Team um Vortkamp Knochenanlagen von Mäuse-Embryonen mit dem mutierten FGF-Rezeptor in Gewebekultur. Tatsächlich entwickelten sie sich bei Zugabe von BMP deutlich normaler. Damit eröffnet sich erstmals ein hoffnungsvoller Ansatz für eine gezielte Therapie der Achondroplasie.

Zudem lehren die Ergebnisse eines: Das Gen zu kennen, das hinter einer Fehlbildung steckt, reicht keineswegs aus, um eine gezielte Behandlungsstrategie zu entwickeln. Vielmehr muss man das gesamte Regulationsnetzwerk verstehen, in das ein solches Gen eingebettet ist.

Als Nächstes gilt es nun zu prüfen, ob die Gabe von BMP oder BMP-aktivierenden Substanzen an junge »Achondroplasie-Mäuse« das Wachstum der Gliedmaßen direkt verbessert. Außerdem will Vortkamps Team untersuchen, welche weiteren Wachstumsfaktoren in dem Regulationsnetzwerk eine Rolle spielen. ◁

Imke Ortmann hat Chemie und Biologie studiert und promoviert an der Universität Münster am Institut für Biochemie und Biotechnologie der Pflanzen.

UNIVERSITY OF FLORIDA LIGHTNING GROUP

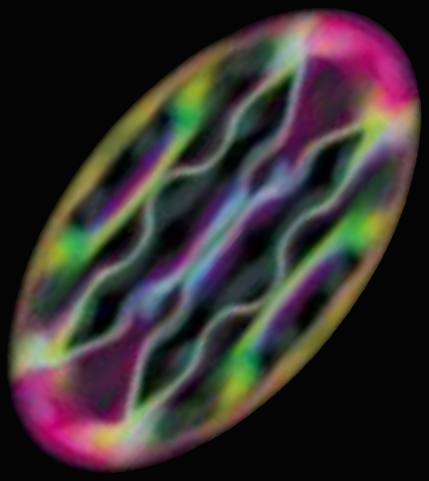


MPI FÜR MOLEKULARE GENETIK, BERLIN

Die Wachstumsfaktoren FGF und BMP *(Bone Morphogenetic Protein)* wirken entgegengesetzt auf die Chondrozyten. So hemmt FGF die Teilung der Knorpelzellen, während BMP sie fördert. Das Umgekehrte gilt für die Differenzierung zu Knochenzellen.

Blitzstart

Während die Rakete in den gewittrigen Nachthimmel Floridas aufsteigt, löst sie mit dem geerdeten Metalldraht, den sie hinter sich herzieht, eine Kaskade von künstlichen Blitzen aus. Mit solchen spektakulären Experimenten suchen die Wissenschaftler am Blitzforschungslabor der Universität von Florida in Gainesville tiefere Einsichten in die physikalischen Vorgänge zu gewinnen, die sich während der elektrischen Entladungen bei Gewittern in der Atmosphäre abspielen. Jüngst konnten sie dabei nachweisen, dass nicht nur Licht und Donner den Spannungsdurchbruch in der Luft begleiten, sondern auch hochenergetische Strahlung im Röntgen- und Gammabereich auftritt *(Science, Bd. 299, S. 694)*. Das geschieht kurz bevor der von den Wolken zur Erde ziehende Leitblitz, der den Plasmakanal für die Entladung erzeugt, den Boden erreicht und den nach oben verlaufenden Hauptblitz auslöst. Als Nachweisgerät diente ein Natriumiodid-Szintillationszähler in 25 Metern Abstand von der Startrampe. Obwohl der Strahlungspuls nur tausendstel Millisekunden dauert und schnell in der Luft absorbiert wird, transportiert er Energien von einigen Dutzend Mega-Elektronenvolt – Werte, wie sie in Teilchenbeschleunigern erreicht werden. Als Ursache vermuten die Forscher so genannte Ausreißerelektronen, die vom elektrischen Feld im Plasma fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden und dann lawinenartig kurzwellige Strahlung freisetzen.



Ultrakalte Atome

Seit 25 Jahren perfektionieren Physiker mehrere Verfahren, winzige Gaswölkchen fast auf den absoluten Nullpunkt zu kühlen. Bei diesen extremen Temperaturen werden die seltsamen Quanteneigenschaften der Materie unmittelbar sichtbar.

Von Yvan Castin

Was geschieht eigentlich, wenn man einem Atom Energie zuführt und dadurch seinen Zustand verändert – das heißt die Bewegung der Elektronen um den Kern oder die Ausrichtung der Spins von Elektronen und Kern? Um das herauszufinden, müssen die Physiker so präzise wie möglich die Energieniveaus des Atoms vermessen. Damit können sie unter anderem die Quantenelektrodynamik überprüfen, die wichtigste Theorie über Aufbau und Verhalten der Atome. Natürlich kann die Qualität einer solchen Prüfung immer nur so gut sein wie die Messung. Doch die von den Atomen gebildete Materie ist warm. Deshalb werden die Energieniveaus der Atome durch den so genannten Doppler-Effekt »verschmiert«: Er verkürzt oder verlängert die Wellenlänge der von einer bewegten Quelle emittierten Strahlung je nachdem, ob die Quelle sich auf den Beobachter zu oder von ihm weg bewegt.

Da die thermische Bewegung der Atome somit die Spektrallinien verbreitert und ihre Vermessung ungenau macht, liegt es nahe, die Temperatur der Proben möglichst tief zu senken. 1975 schlugen Theodor Hänsch von der Universität München und Arthur Schwalow von der Stanford University (Kalifornien) eine Methode vor, elektrisch neutrale Gase bis nahe an den absoluten Nullpunkt zu kühlen. In der gleichen Zeit entwickelten Daniel Wineland und Hans Dehmelt an der University of Washington ein Verfahren, Ionen in einem elektromagnetischen Feld einzufangen und zu kühlen. Aus diesen Ideen entwickelte sich eine neue Teildisziplin der Atomphysik, aus der mehrere Nobelpreisträger hervorgingen: im Jahre 1997 Stephen Chu, Claude Cohen-Tannoudji und William Philips sowie im Jahre 2001 Eric Cornell, Wolfgang Ketterle und Carl Wieman.

Vom Doppler-Effekt zur Laserkühlung

Das erste Kühlverfahren macht sich auf raffinierte Weise den Doppler-Effekt selbst zunutze. Das zu kühlende Atom wird von zwei Laserstrahlen derselben Frequenz aus entgegengesetzten Richtungen angestrahlt. Die Laserfrequenz ist gerade so eingestellt, dass die Photonen vom Laborsystem aus gesehen eine geringfügig kleinere Energie aufweisen, als nötig wäre, um das Atom von seinem Grundzustand in den ersten angeregten Zustand zu versetzen. Doch aufgrund des Doppler-Effekts erscheint das Laserlicht einem Atom, das sich auf den einen Laser zu bewegt, zu höheren Frequenzen – und Energien – verschoben. Damit aber reicht diese Energie, um das Atom anzuregen: Es absorbiert ein Photon und verringert dabei seine Geschwindigkeit. Anschließend fällt das angeregte Atom sofort wieder in den Grundzustand zurück, sendet dabei ein Photon in beliebige Richtung aus und erfährt einen Rückstoß.

Auf diese Weise ändern die zwischen den Strahlen eingefangenen Atome ständig ihre Geschwindigkeit – und zwar so, dass sie relativ zu den beiden Lasern immer langsamer werden. Das hier für eine Dimension beschriebene

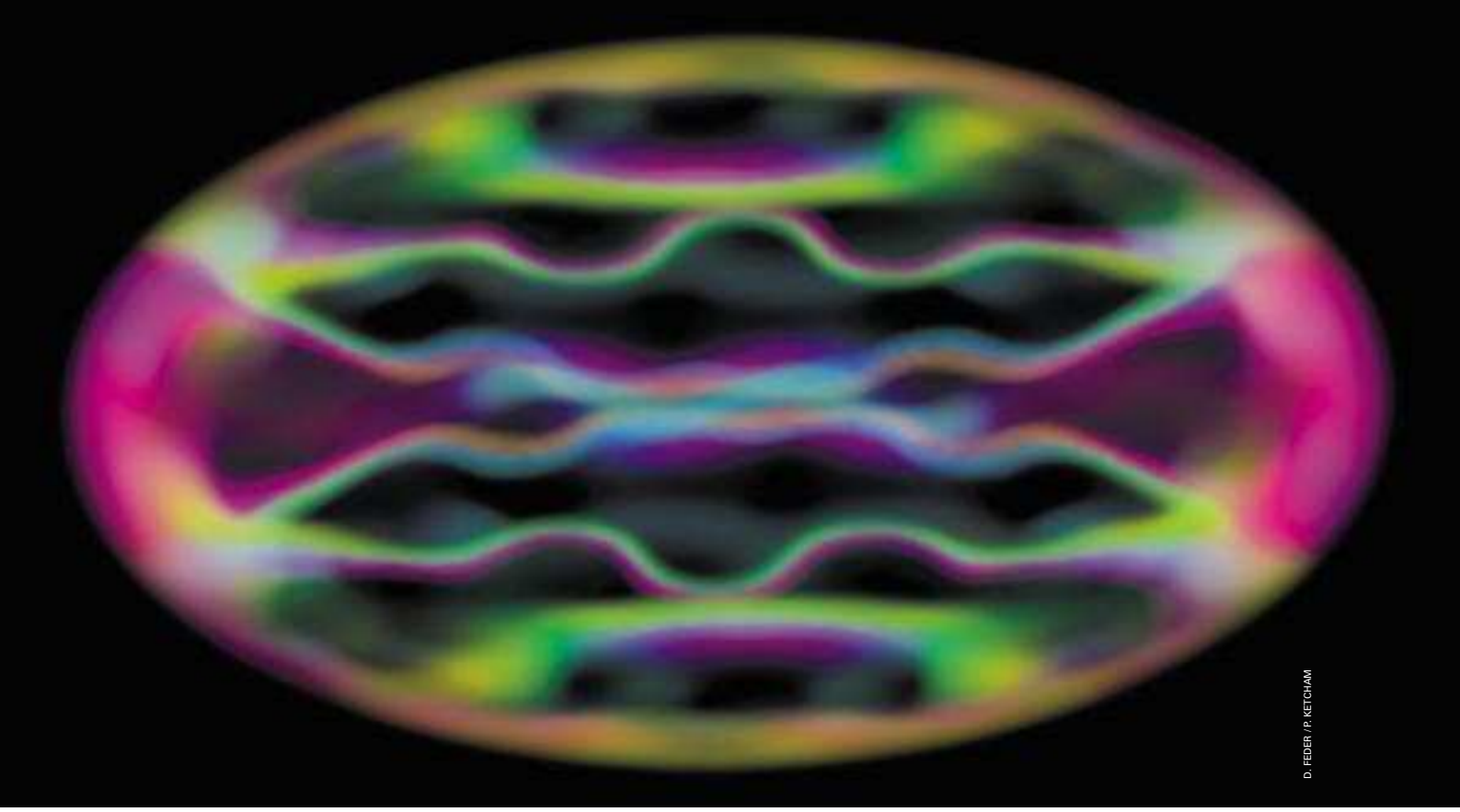
SERIE

25 Jahre Spektrum DER WISSENSCHAFT

In dieser 12-teiligen Serie berichten prominente Forscher aus ihrem Fachgebiet über wissenschaftliche Highlights der letzten 25 Jahre, die aktuelle Situation und künftige Perspektiven.

Teil I: Paläoanthropologie
Teil II: String-Physik
Teil III: Gehirnforschung
Teil IV: Klimaforschung
Teil V: Mathematisches Denken
Teil VI: Ultrakalte Atome

Im nächsten Heft
Teil VII: Die Chemie beherrschen



Ein Bose-Einstein-Kondensat ist eine Wolke aus Millionen ultrakalter Atome, die einen gemeinsamen Quantenzustand bilden – ein einziges, mehrere tausendstel Millimeter großes Wellenpaket. Die Phase der Quantenwelle variiert von einem Punkt der Wolke zum anderen, wenn wie in dieser Computersimulation Wirbel – die Schlangenlinien im Bild – in sie eindringen. Im Bild sind den unterschiedlichen Phasen Farben zugeordnet.

Kühlverfahren lässt sich auf drei Dimensionen erweitern: Die Physiker bauen drei Paare von gegeneinander gerichteten Lasern auf, deren Strahlen sich am Ort der kleinen Atomwolke kreuzen.

Theoretisch betrachtet verhalten sich die Atome, wenn sie erst einmal hinreichend verlangsamt sind, als seien sie einer zur Geschwindigkeit proportionalen Bremskraft ausgesetzt. Da diese Kraft genau wie die Reibung in einer zähen Flüssigkeit wirkt, sprechen die Physiker von einem »optischen Sirup«.

Die Atome ändern in diesem Sirup ständig ihre Geschwindigkeit und beschreiben einen Zufallspfad, welcher der Brown'schen Molekularbewegung ähnelt. Im thermodynamischen Gleichgewicht entspricht die verbleibende Bewegung einer Temperatur, die sich theoretisch vorhersagen lässt. Für die gegenwärtig verwendeten Alkaliatome Natrium, Rubidium und Cäsium liefert die Theorie eine minimale Temperatur von rund hundert Mikrokelvin (millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt). In der Praxis konnte diese theoretische Grenze sogar mühelos unterschritten werden – ein seltener Fall in der Geschichte der Physik.

Dem Nullpunkt so nah

Das Erzeugen des optischen Sirups ist ein heikles Unterfangen. Die untersuchten Gasatome schießen mit mehreren hundert Metern pro Sekunde aus einem Heizofen – viel zu schnell, als dass sie in einem optischen Käfig eingefangen werden könnten. Zunächst müssen sie von einem anderen Laser gebremst werden. 1986 schlug Jean Dalibard von der École Normale Supérieure in Paris ein neuartiges Verfahren vor, die so genannte magnetooptische Falle. Der optische Sirup wird mit einem magnetischen Feld überlagert, das an einem Punkt verschwindet – und genau dort sammeln sich dann die Atome. Dank der Falle genügt es, atomares Gas bei normaler Zimmertemperatur in einem einfachen Glasgefäß erst magnetisch einzufangen und anschließend optisch zu kühlen.

Diese Technik gab es noch gar nicht, als Steven Chu 1985 an der Stanford University den ersten optischen Sirup erzeugte und Temperaturen nahe der theoretischen Grenze erzielte. Als William Phillips vom National Bureau of Standards – dem heutigen National Institute of Standards and Technology in Gaitherburg (Maryland) – drei Jahre später genauere Messungen durchführte, stellte sich heraus, dass die Temperatur der gekühlten Atome sogar deutlich unter dem theoretischen Limit lag. Wie ließ sich die angenehme Überraschung erklären?

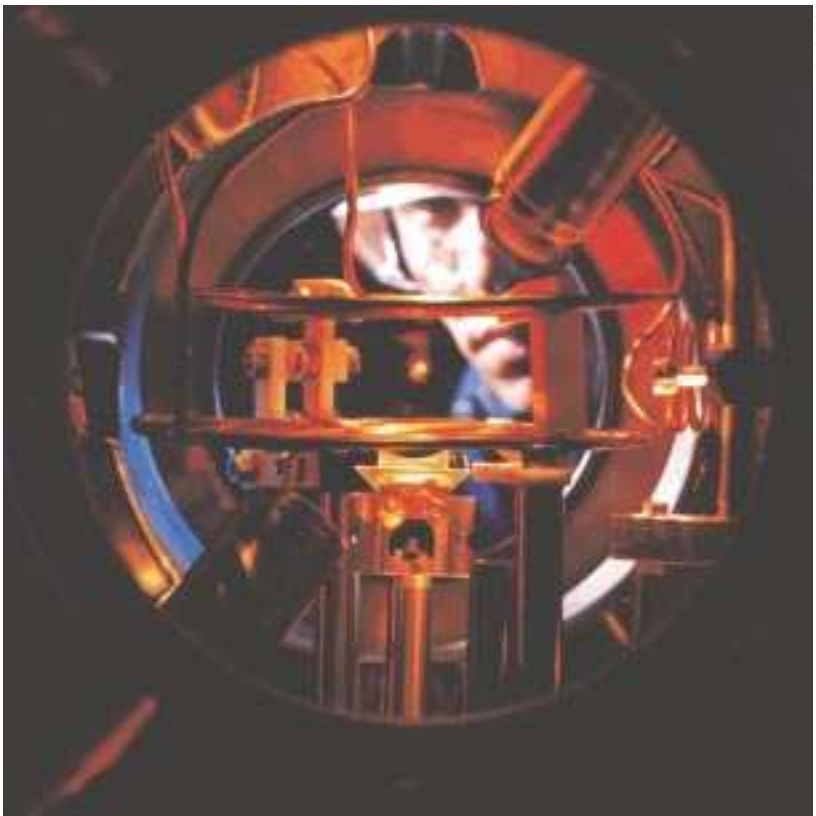
Offenbar war das verwendete Atommodell zu simpel. Wie die Teams um Stephen Chu sowie um Claude Cohen-Tannoudji und Jean Dalibard unabhängig voneinander begriffen, musste man berücksichtigen, dass die Energieniveaus der Atome durch den so genannten Zeeman-Effekt in Unterniveaus aufgespaltet werden.

Normalerweise fallen diese Zeeman-Niveaus zusammen, doch in Anwesenheit eines äußeren Magnetfelds unterscheiden sie sich, ▷

▷ wobei der Unterschied von der Stärke und der Polarisation des Magnetfelds abhängt. Da die Polarisation des Laserlichts im Sirup örtlich variiert, verändert sich für ein darin bewegtes Atom die Stärke und Polarisation des Magnetfelds, und entsprechend spalten sich die Unterniveaus abwechselnd stärker und schwächer auf. Angenommen, es gibt zwei Unterniveaus *a* und *b*, und auf dem Weg des Atoms wächst die Energie *a* ein wenig, während die Energie *b* sinkt. Das Atom befinde sich anfangs im Zustand *a*. Also erhöht sich unterwegs seine potenzielle Energie – und wegen der Energieerhaltung muss daher seine Bewegungsenergie abnehmen. Das Atom wird langsamer, als ob es einen Berg hinaufrollen müsste. Wenn es sozusagen oben angekommen ist, rollt es wieder bergab und bekommt seine ursprüngliche Geschwindigkeit zurück.

Die Theorie der optischen Anregung zeigt allerdings, dass das Atom nach Erreichen des Gipfels mit hoher Wahrscheinlichkeit zum Unterniveau *b* mit der niedrigeren Energie übergeht. Dies geschieht, indem das Atom zunächst durch ein Photon des Lasers angeregt wird und danach unter spontaner Emission eines anderen Photons in den Grundzustand zurückfällt (siehe Bild Seite 31 rechts). Dadurch landet das Atom am Fuße des Berges, ohne seinen ursprünglichen Schwung wiederzugewinnen. Die Atome, deren Unterniveaus *a* und *b* gegeneinander phasenverschoben sind – die Täler des einen fallen mit den Gipfeln des anderen zusammen –, werden also auf ihrem Weg durch den optischen Sirup gezwungen, immer wieder Potenzialberge zu erklimmen, ohne die aufgewendete Energie je zurückzubekommen.

Eine magnetooptische Falle erzeugt ein magnetisches Feld, dessen Intensität zum Mittelpunkt hin stetig auf null sinkt. Dort werden Natriumatome – kenntlich am gelben Leuchten – festgehalten und durch sechs gekreuzte Laserstrahlen gekühlt.



S. ROLSTON

Dieser Mechanismus, den die Physiker wegen seiner Analogie zur griechischen Sagengestalt »Sisyphus-Kühlung« nennen, bremst Atome auf eine Geschwindigkeit von einigen Zentimetern pro Sekunde ab. Dies entspricht einer Temperatur, die zehn- bis fünfzigmal niedriger ist als der theoretische Minimalwert der Laserkühlung mit Doppler-Effekt.

Sichtbare Quantenobjekte

Wie weit lässt sich die Kühlung treiben? Bei der Sisyphus-Kühlung emittiert das Atom jeweils ein Photon und erfährt dadurch einen Rückstoß in eine zufällige Richtung. Dies verleiht ihm eine kleine Menge kinetischer Energie. Es schien zunächst unmöglich, unter dieses »Rückstoßlimit« zu gelangen. Doch 1988 schlugen C. Cohen-Tannoudji, Alain Aspect und Ennio Arimondo einen subtilen quantenmechanischen Trick vor. Sie nannten ihre Methode »kohärentes Einfangen selektiver Geschwindigkeitspopulationen« oder Kühlung durch »schwarze Resonanz«.

Die Quantenmechanik lehrt, dass ein Atom sich in einer Superposition mehrerer unterschiedlicher Zustände befinden kann. Man kann Atome in einen solchen Überlagerungszustand bringen und so manipulieren, dass sie, wenn ihre Geschwindigkeit im Laborsystem null ist, keine Photonen mehr aus dem Laserstrahl zu absorbieren vermögen. Dann spricht man von schwarzer Resonanz. Mit der Sisyphus-Methode gekühlte Atome befinden sich bereits in der Nähe der schwarzen Resonanz. Solange ihre Geschwindigkeit von null verschieden ist, absorbieren sie Photonen und emittieren sie wieder in beliebige Richtungen. Doch wenn ein Atom im Laufe seiner Zufallsbewegung einmal zur Ruhe kommt, kann es in den schwarzen Zustand fallen: Es absorbiert und emittiert keine Photonen mehr und bleibt völlig unbeweglich.

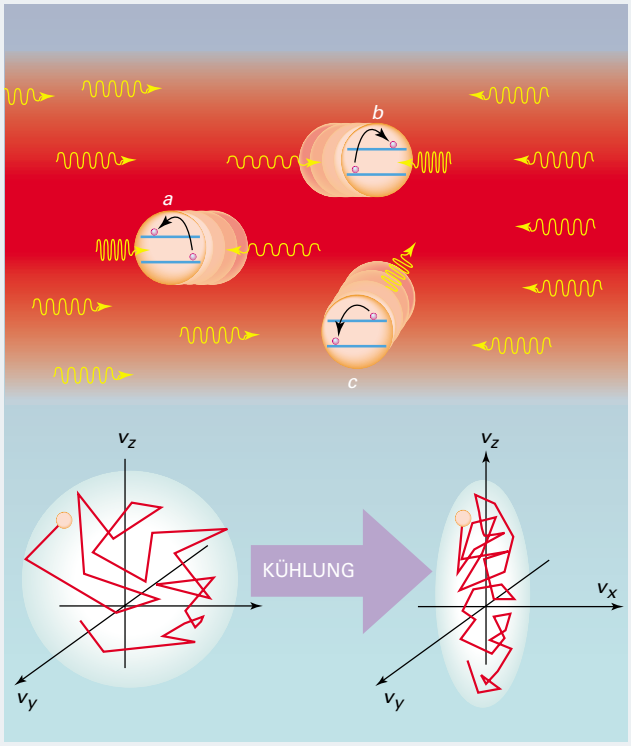
Bei diesem Mechanismus gibt es keine prinzipielle Grenze für die Kühlung mehr. In einer Dimension hat man mit diesem Verfahren Temperaturen in der Größenordnung von Nanokelvin (milliardstel Kelvin) erreicht – ein Zehntausendstel der Werte, die mit der Sisyphus-Methode zu schaffen sind.

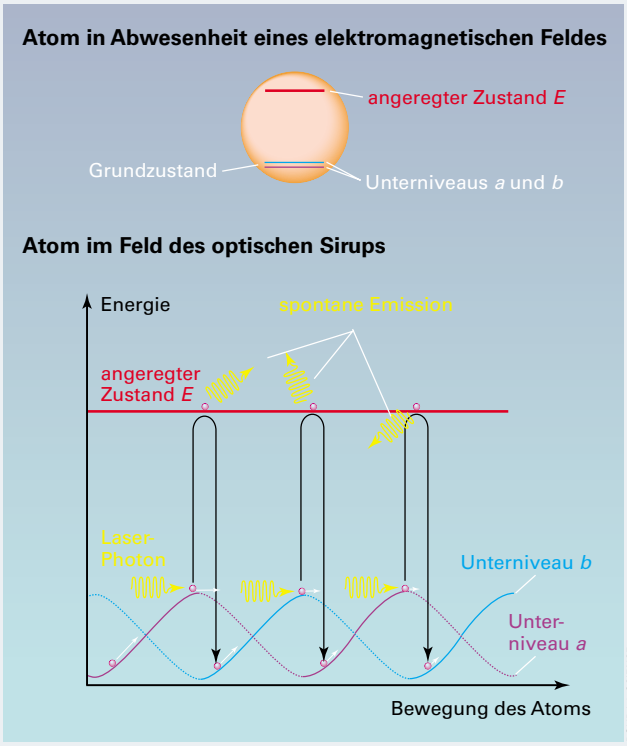
Ultrakalte Atome erlauben den Physikern, einen direkten Blick in die Quantenwelt zu werfen. Seit der französische Physiker Louis de Broglie (Nobelpreis 1929) so genannte Materiewellen postulierte, wissen die Forscher, dass sich aufgrund des Welle-Teilchen-Dualismus Partikel mitunter wie Wellen verhalten, während umgekehrt Licht nicht nur Wellen-, sondern auch Partikeleigenschaften zeigt. Diese Dualität ist nicht immer einfach nachzuweisen. Bei kleinen Lichtwellenlängen treten charakteristische

Wie man Atome mit Licht ausbremst

Bei der Laserkühlung wird ein Atom von zwei Lasern gleicher Frequenz aus entgegengesetzten Richtungen bestrahlt. Die Energie der Photonen (gelb) liegt knapp unter der Anregungsenergie des Atoms, doch aufgrund des Doppler-Effekts empfangen Atome, die sich auf einen der Laser zu bewegen, eine etwas höhere Photonenenergie, die zum Absorbieren gerade reicht *(a* und *b)*. Dabei wird das Atom in Richtung Laser abgebremst. Wenn es wieder ein Photon emittiert, erfährt es einen Rückstoß in eine zufällige Richtung *(c)*. Die Atome werden in Richtung der Laser (*x*-Achse) immer langsamer. Um Atome in allen Richtungen zu bremsen, überlagert man sechs Laser.

Der Sisyphus-Effekt vermag bestimmte Atomsorten weit unter das theoretische Limit der Laserkühlung zu bremsen. Der Grundzustand dieser Atome muss zwei Unterniveaus *(a* und *b)* enthalten, deren Energien vom Feld der Laserstrahlung aufgespaltet werden. Wenn ein Atom im Zustand *a* einen Bereich durchquert, in dem das Unterniveau an Energie gewinnt, verlangsamt es sich, als müsste es einen Berg hinaufrollen. Das Atom erhält seine Bewegungsenergie nicht wieder zurück, wenn es durch ein Photon angeregt wird und danach unter spontaner Emission eines anderen Photons in das jeweils tiefere Unterniveau zurückfällt. Auf diese Weise klettert das Atom auf seinem Weg durch den optischen Sirup quasi immer nur bergauf.



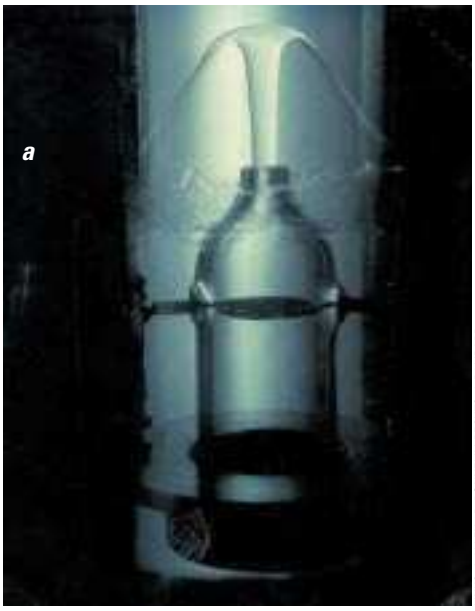


Wellenphänomene wie Brechung und Interferenz nicht auf; das Licht lässt sich dann völlig ausreichend durch eine Teilchentrajektorie beschreiben. Entsprechend verbergen auch Materiepartikel ihre Wellennatur, solange die ihnen zugeordnete Wellenlänge klein ist. Diese De-Broglie-Wellenlänge ist umgekehrt proportional zur Masse und Geschwindigkeit des Partikels. Deswegen ist sie nicht nur für makroskopische Objekte sehr klein, sondern auch für Atome, die sich mit normalen Geschwindigkeiten bewegen. Das ändert sich bei ultrakalten Atomen radikal: An ihnen lassen sich tatsächlich – etwa im Doppelspaltexperiment – spektakuläre Interferenzerscheinungen beobachten.

Auch andere Wellenphänomene wurden nachgewiesen, insbesondere die so genannten Bloch-Schwingungen. 1929 sagte der schweizerisch-amerikanische Physiker Felix Bloch voraus, dass ein konstantes elektrisches Feld in einem Metall einen Wechselstrom erzeugen muss. Das erscheint verwirrend, lässt sich aber quantenmechanisch erklären: Die Elektronen des Metalls verhalten sich wie Wellen, die von dem elektrischen Feld angeregt werden und an den Kristallebenen eine so genannte Bragg-Reflexion erleiden. Daher sollte es zusätzlich zu der Elektronenbewegung in Richtung des äußeren Feldes einen zweiten elektrischen Strom in einer von der Struktur des Metalls vorgegebenen Richtung geben. Normalerweise werden die Elektronen allerdings an Gitterfehlern gestreut, welche die Bragg-Reflexion zerstören, und man beobachtet nur einen Gleichstrom. ▷

▷ Erst mit ultrakalten Atomen kann der von Bloch vorhergesagte Wechselstrom modellhaft demonstriert werden. Zu diesem Zweck baut eine stehende Laserwelle ein periodisches Potenzial auf, das die Rolle des Kristallgitters übernimmt. Da Atome neutral sind und sich somit nicht durch ein elektrisches Feld beschleunigen lassen, simuliert man die durch das Gitter wandernden Elektronen, indem das durch die Laserwelle gebildete »Kristallgitter« mit konstanter Beschleunigung verschoben wird. Tatsächlich beobachtet man dann, dass die Atome relativ zum Kristallgitter eine Schwingungsbewegung ausführen.

Ultrakalte Atome werden heute schon praktisch verwendet. Beispielsweise ist dadurch die Präzision von Atomuhren deutlich gestiegen. Bemerkenswert ist auch die Nano-Lithografie, bei der ein Strahl ultrakalter Atome winzigste Strukturen auf der Oberfläche eines Festkörpers erzeugt. Vor allem aber wurde mit ultrakalten Atomen eine seltsame Vorhersage bestätigt, die Albert Einstein vor fast achtzig Jahren gemacht hatte. Damals revolutionierte die Quantenmechanik gerade die statistische Physik. Im Jahre 1924 berechnete der



LINKS: J. ALLEN / R. DONNELLY; RECHTS: J. DALIBARD

indische Physiker Satyendra Nath Bose, dass die Photonen der Schwarzkörperstrahlung sich im Innern eines Hohlkörpers im thermodynamischen Gleichgewicht befinden und einem seltsamen Verteilungsgesetz gehorchen. Die Photonen gehören zu einer Gruppe von Elementarteilchen, die man heute – Bose zu Ehren – als Bosonen bezeichnet. Bosonen sind gesellig: Je mehr sich bereits in einem bestimmten Zustand befinden, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass weitere Bosonen denselben Zustand annehmen. Kurze Zeit später verallgemeinerte Einstein die Überlegungen von Bose auf Materiepartikel.

Einsteins erstaunliche Prophezeiung

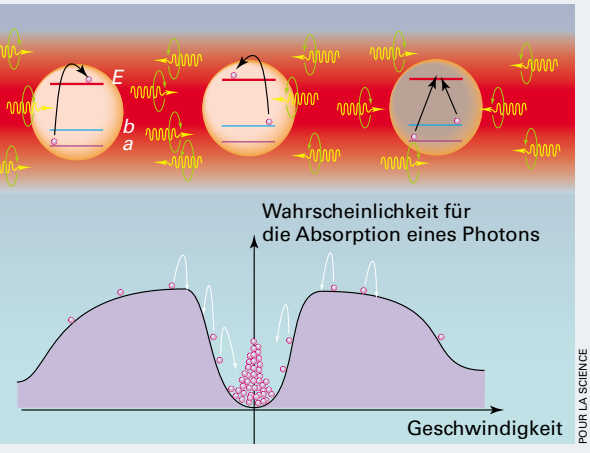
Betrachten wir den Fall näher. In einem geschlossenen Kasten haben die Partikel diskrete Energiezustände, so wie die Membran einer Trommel nur eine begrenzte Anzahl von Schwingungsmoden aufweist. Aus der Sicht der klassischen Physik entspricht der Grundzustand jenen Partikeln, die in Ruhe auf dem Boden des Kastens liegen. Angeregte Zustände dagegen entsprechen Partikeln, die in alle Richtungen gegen die Innenwände prallen. Von der Bose-Statistik ausgehend konnte Einstein zeigen, dass bei konstanter Temperatur nur eine bestimmte Anzahl von Bosonen in angeregte Zustände übergehen kann. Packt man mehr Bosonen in den Kasten, so sammeln sich die überzähligen Partikel im Grundzustand an und bilden ein so genanntes Bose-Einstein-Kondensat. Einstein zufolge findet dieser Phasenübergang – die Kondensation – bei einer kritischen Temperatur statt, die proportional zur Dichte des betrachteten Gases hoch 2/3 ist. Das heißt: je dünner das Gas, desto geringer diese Temperatur.

Es dauerte siebzig Jahre, bis Einsteins Vorhersage experimentell bestätigt werden konnte. Bei normalen Dichten ist die Übergangstemperatur sehr niedrig – kleiner als ein Kel-

Die schwarze Resonanz

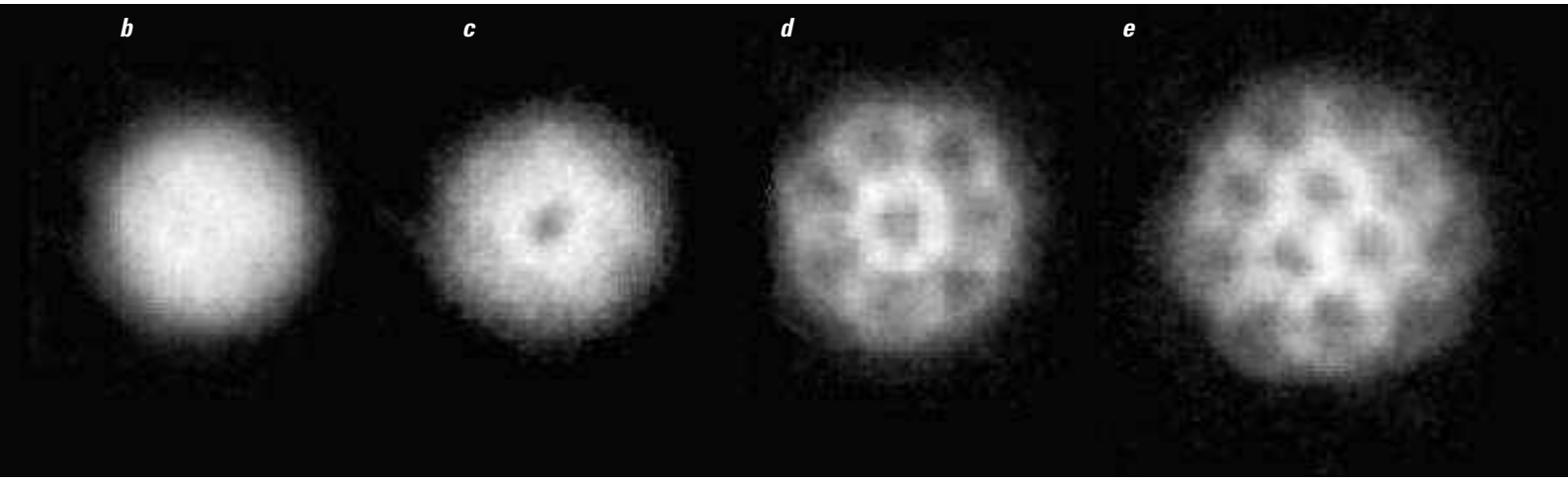
Ein Tal, aus dem es kein Entkommen gibt

Damit ein Atom einen »schwarzen Zustand« erreichen kann, muss sein Grundzustand zwei Unterniveaus *a* und *b* aufweisen. Zwei Laser sind so eingestellt, dass die vom linken Laser kommenden Photonen das Atom nur vom Unterniveau *a* zum Zustand *E* anregen können, die von rechts kommenden nur von *b* nach *E*. Man kann das Atom in eine quantenmechanische Superposition der Zustände *a* und *b* versetzen und dafür sorgen, dass die Wahrscheinlichkeitsamplituden für die Übergänge von *a* nach *E* und von *b* nach *E* destruktiv interferieren – das Atom absorbiert niemals ein Photon. Damit das Atom dauerhaft »schwarz« bleibt, muss es allerdings exakt in Ruhe sein. Andernfalls erscheinen dem Atom aufgrund des Doppler-Effekts die Frequenzen der beiden Laser verschoben, und die Wahrscheinlichkeitsamplituden der zwei Übergänge löschen einander nicht mehr völlig aus.



POUR LA SCIENCE

Da die präparierten Atome zunächst nicht ruhen, absorbieren und emittieren sie ständig Photonen. Sie führen Zufallsbewegungen aus, bis sie irgendwann zufällig eine sehr geringe Geschwindigkeit erreichen. Nun können sie in den schwarzen Zustand fallen: Sie absorbieren keine Photonen mehr und kommen praktisch zum Stillstand. Im Diagramm erscheint der schwarze Zustand als Fallgrube, aus der für die Atome kein Weg in die Freiheit führt.



vin. Man müsste also den zu untersuchenden Stoff auf eine Temperatur abkühlen, bei der normalerweise alle Gase längst zu einem Festkörper kristallisiert sind und kein Kondensat mehr bilden können. Doch 1938 entdeckten der sowjetische Physiker Pjotr Kapitza sowie unabhängig davon die Amerikaner John Allen und Don Misener, dass Helium-4 eine Ausnahme bildet. Es bleibt selbst bei extrem tiefen Temperaturen flüssig und erfährt bei 2,2 Kelvin eine seltsame Phasenumwandlung. Unterhalb dieser Schwelle ist Helium »suprafluid«: Es fließt ohne jede Viskosität. Noch im selben Jahr stellte der deutsch-amerikanische Physiker Fritz London zur Erklärung die These auf, in der Flüssigkeit formiere sich eine Gruppe von Atomen zu einem Bose-Einstein-Kondensat. Heute glauben die Physiker, dass in suprafluidem Helium nur zehn Prozent der Atome tatsächlich ein Bose-Einstein-Kondensat bilden.

Erst ein halbes Jahrhundert später, im Jahr 1995, gelang es den Amerikanern Eric A. Cornell und Carl E. Wieman erstmalig, ein gasförmiges Bose-Einstein-Kondensat herzustellen. Die beiden Forscher hatten Erfolg, weil sie ein Gas verwendeten, dessen Dichte etwa eine Milliarde Mal geringer war als die von flüssigem Helium und etwa zehn Millionen Mal kleiner als die Dichte von Luft unter normalen Bedingungen. Bei einer derart geringen Dichte sind Dreierstöße wesentlich seltener als Kollisionen von nur zwei Atomen. Das ist ein großer Vorteil, da nur Dreierstöße zum festen Aggregatzustand führen. Wenn zwei Atome kollidieren, sorgen Energie- und Impulserhaltung dafür, dass sie nicht zusammenbleiben. Bei einem Dreierstoß hingegen verbinden sich zwei Atome, während das dritte Atom die überschüssige Bewegungsenergie mit sich fortführt. Ein Gas, das so dünn ist, dass es in ihm kaum Dreierstöße gibt, kann daher nicht in den festen Aggregatzustand übergehen. Durch Kühlung dieses Gases lässt sich die Bose-Einstein-Kondensation erreichen, bevor ein Festkörper entsteht.

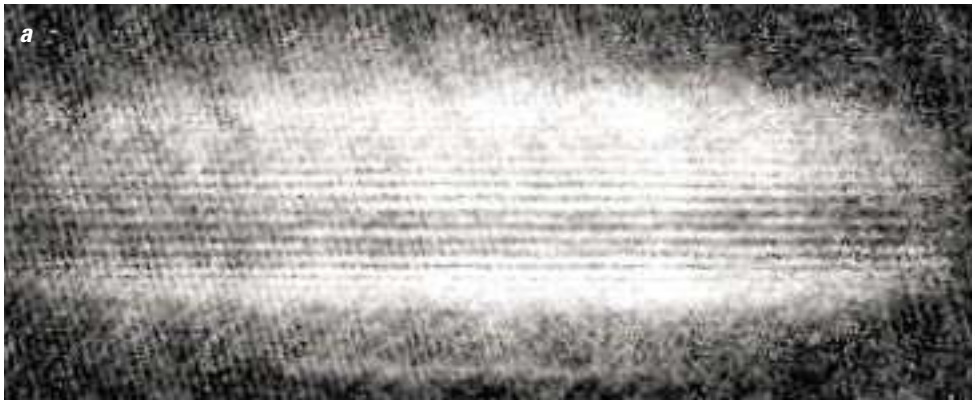
In der Praxis reicht allerdings die Laserkühlung allein dafür nicht aus. Normalerweise beginnen die Physiker mit einer isolierten und in einer magnetooptischen Falle vorgekühlten atomaren Gaswolke. Diese Wolke wird dann in eine magnetische Flasche überführt und durch Verdunstung weiter gekühlt: Man lässt einfach die Atome mit der höchsten kinetischen Energie entweichen. Dadurch sinkt die mittlere kinetische Energie der restlichen Atome und somit die Temperatur der Wolke. Das erste Kondensat kam erst bei zwanzig Nanokelvin zu Stande, aber heute erzeugen die Physiker Kondensate schon bei Temperaturen in der Größenordnung von Mikrokelvin.

Kohärente Materiewellen

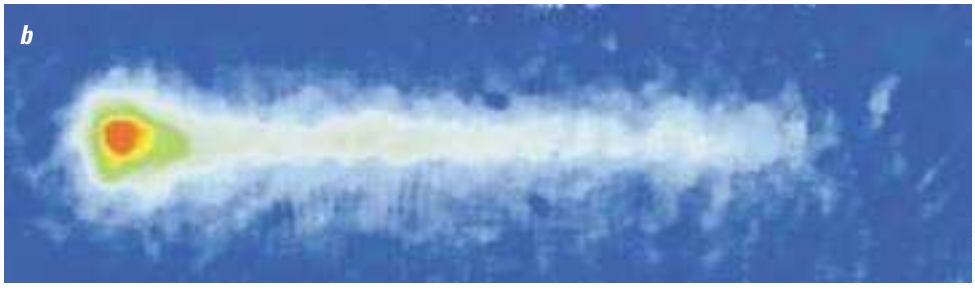
Die Kondensate sind ein neues Mittel, um die Suprafluidität zu erforschen. Dreht man einen Behälter, in dem sich eine normale Flüssigkeit befindet, so beginnt sich die Flüssigkeit durch Reibung mitzudrehen. Suprafluide Flüssigkeiten hingegen rotieren nicht mit, sofern der Behälter langsam genug gedreht wird: Da sie keinerlei innere Reibung aufweisen, bleiben sie völlig unbeweglich. Erreicht die Rotationsgeschwindigkeit jedoch einen gewissen Schwellenwert, so vermittelt der Behälter der Flüssigkeit doch eine gewisse Rotation. Sie zeigt sich in Form quantenmechanischer Wirbel, die Vortex genannt werden. Vortizes sind in suprafluidem Helium schwierig nachzuweisen, machen sich aber in Kondensaten deutlich bemerkbar.

Der Quantenmechanik zufolge ist der Drehimpuls gequantelt; das heißt, er kann nur diskrete Werte annehmen. Da das Drehimpulsquant sehr klein ist – von der Größenordnung 10^{-34} Joule × Sekunden –, bemerken wir im täglichen Leben nichts von dieser Quantisierung. Versucht man allerdings, eine suprafluide Flüssigkeit in Rotation zu versetzen, so ▷

Eine suprafluide Flüssigkeit fließt ohne Viskosität und schießt daher allein durch die Kapillarkräfte in hohem Bogen aus einer Flasche *(a)*. Für diese Eigenschaft ist die Bose-Einstein-Kondensation eines Teils der Atome verantwortlich. In Helium-4-Kondensaten, die von einem Laser »umgerührt« werden, wird die Quantisierung des Drehimpulses sichtbar. Unterhalb einer ganz bestimmten Rotationsgeschwindigkeit des Laser-»Rührlöffels« weigert sich die Kondensatwolke, mitzurotieren *(b)*. Bei Überschreiten der Schwelle erscheint ein Vortex *(c)*. Steigt die Rotationsgeschwindigkeit weiter an, kommen weitere hinzu *(d* und *e)*.



W. KETTERLEY



S. ROLSTON

Ultrakalte Atome machen die Welleneigenschaften der Materie direkt sichtbar. Werden zwei Kondensate überlagert, so verhalten sie sich als interferierende Materiewellen und bilden Interferenzstreifen – das heißt Zonen, die abwechselnd mit Materie gefüllt und leer sind *(a)*. Außerdem demonstrieren Physiker bereits so genannte Atomlaser: Aus einem Kondensat (rot) treten kohärente Atomstrahlen aus – die Atome spielen die Rolle der Photonen im Laserstrahl *(b)*.

schlägt das »Herdenverhalten« ihrer Komponenten durch: Die Rotation lässt sich nicht erzeugen, ohne alle Atome mit einzubeziehen. Dieses Kollektivverhalten vergrößert gewissermaßen die Quantennatur des Drehimpulses zu einem makroskopischen Effekt: Bis zu einer bestimmten Rotationsgeschwindigkeit bleibt die gesamte Gaswolke in Ruhe, alle Atome haben Drehimpuls null. Bei Überschreiten der Schwelle bildet sich plötzlich in der Mitte des kugelförmigen Kondensats ein Vortex, in dem nun alle Atome ein Impulsquant haben (siehe Bild Seite 33). Dieses Phänomen ist typisch für Supraflüssigkeiten.

Da ein Bose-Einstein-Kondensat ein Ensemble von mehreren Millionen Alkaliatomen ist – beziehungsweise sogar von mehreren Milliarden Wasserstoffatomen –, die durch ein und dieselbe Wellenfunktion dargestellt werden, bildet es praktisch eine einzige Wellenfunktion makroskopischen Ausmaßes. Insofern gleicht die Bose-Einstein-Kondensation dem Laser, der ebenfalls bosonische Kollektiveffekte nutzt, um die Photonen in einen gemeinsamen Zustand zu versetzen. Darum konnten die Physiker mithilfe von Kondensaten bereits »Atomlaser« konstruieren, die Atome statt Photonen emittieren. Theoretisch lässt sich ein atomares Feld definieren, das sich zu dieser quantenmechanischen Materiewelle verhält wie das klassische elektromagnetische Feld zum Licht. Wie die Laserstrahlung sich gut als die Ausbreitung von Schwingungen eines klassischen, kohärenten elektromagnetischen Feldes beschreiben lässt – mit einer exakt determinierten Amplitude an jedem Punkt des Raumes –, so kann man ein Kondensat als »Atomfeld« auffassen, das sich ebenfalls klassisch-kohärent verhält und nicht wie eine Ansammlung individueller Teilchen. Das wurde in einem eindrucksvollen Experiment durch Überlagerung zweier Kondensate bestätigt: Sie bilden Interferenzstreifen, die abwechselnd leer und erfüllt von Materie sind (siehe Bild oben).

Freilich gibt es Unterschiede zwischen Materie- und Lichtwellen. Im Gegensatz zu Photonen treten Atome in kräftige Wechselwirkung miteinander. Dadurch hängt ihre Ausbreitung von der Anzahl der bereits vorhandenen Artgenossen ab. Dies führt zu nichtlinearen Phänomenen. Das Äquivalent dazu wären bei elektromagnetischen Wellen zum Beispiel Lichtbündel, deren Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Intensität abhängt. Licht zeigt tatsächlich nichtlineare Phänomene geringer Intensität, allerdings nur in speziellen Medien. Bei den Materiewellen eines Kondensats entstehen solche Phänomene hingegen im Vakuum. Daraus beginnt eine neue Disziplin zu entstehen, die »nichtlineare Atomoptik«.

Anhand ultrakalter Atome und Kondensate können wir Physiker heute die Welleneigenschaften der Materie fast genauso direkt untersuchen wie die des Lichts. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts versprach De Broglies Entdeckung der Materiewellen, wir würden eines Tages mit Materie all das anstellen können, was uns schon seit langem mit Licht gelingt. Vor 25 Jahren wurden Kühltechniken entwickelt, die diesen Traum endlich wahr werden lassen: Das Manipulieren von Materiewellen hat den Rückstand zur Optik aufgeholt.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Yvan Castin forscht am Laboratoire Kastler-Brossel der École Normale Supérieure in Paris.

Zur Theorie der Bose-Einstein-Kondensation in Atomfallen. Von Jürgen Reidl. Shaker Verlag, Aachen 2002.

Das kälteste Gas im Universum. Von Graham P. Collins in: Spektrum der Wissenschaft 2/2001, S. 50.

Die Bose-Einstein-Kondensation. Von Eric A. Cornell und Carl E. Wieman in: Spektrum der Wissenschaft 5/1998, S. 44.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

GEOWISSENSCHAFTEN

Starke Beben mit schwachen Folgen

Bis zu zwölf Meter hohe Steilstufen entstanden 1999 in Taiwan bei einem Erdbeben der Stärke 7,6 auf der Richterskala. Erstaunlicherweise gab es jedoch gerade dort, wo die größten Geländesprünge auftraten, die geringsten Schäden. Dasselbe paradoxe Muster zeigte sich dann vor einem Jahr bei einem Beben der Stärke 7,9 in Alaska. Emily Brodsky und ihre Geophysiker-Kollegen an der Universität von Kalifornien in Los Angeles glauben nun eine Erklärung für das überraschende Phänomen gefunden zu haben. Demnach entstehen die gefährlichen hochfrequenten Erschütterungen mit hoher Beschleunigung des Bodens vor allem dann, wenn sich an einer Störung, die beim Erdbeben aufreißt, die rauen Oberflächen der Gesteinspakete aneinander reiben. Bei großen Verschiebungen gerät das Grundwasser jedoch unter Druck. Zusammen mit tonigen Sedimenten bildet es dann ein Schmiermittel, das sich zwischen die sich bewegenden Blöcke zwängt und sie auseinander presst. Die Reibung wird dadurch deutlich vermindert. Infolgedessen verläuft die Scherbewegung glatter und ruft nur relativ harmlose niederfrequente Schwingungen hervor. *(Geophysical Research Letters, Bd. 30, S. 1244)*

TADANOBU SATO, UNIVERSITÄT KIOTO

▲ Diese Steilstufe entstand beim Erdbeben in Taiwan 1999.

MEDIZIN

Stammzellen gegen Multiple Sklerose

Bei der Multiplen Sklerose greift das Immunsystem in einer fehlgeleiteten Abwehrreaktion die isolierende Hüllschicht körpereigener Nervenfasern an und zerstört sie mit der Zeit. Das beeinträchtigt die Weiterleitung der Signale im zentralen Nervensystem – darunter auch die Übertragung der Befehle vom Gehirn an die Muskulatur. Die Folge sind unaufhaltsam fortschreitende Lähmungen. Forschern am Hospital San Raffaele in Mailand ist es nun jedoch an Mäusen gelungen, die Erkrankung nicht nur aufzuhalten, sondern sogar zu heilen. Die Versuchstiere litten unter experimenteller allergischer Encephalomyelitis – einem Tiermodell für Multiple Sklerose. Die Forscher spritzten ihnen adulte neuronale Stammzellen. Diese Vorläufer von Nervengewebe lagerten sich an die beschädigten Nervenfasern an und bildeten so genannte Oligodendrozyten, die das Myelin für den Wiederaufbau der isolierenden Hüllschicht produzierten. 45 Tage nach der Injektion konnten 4 von 15 kranken Mäusen wieder laufen und die übrigen 11 zeigten deutlich weniger Lähmungserscheinungen. Nun gilt es herauszufinden, ob die Methode auch beim Menschen erfolgreich ist. *(Nature, 17. 4. 2003, S. 688)*

FONDAZIONE CENTRO SAN RAFFAELE DEL MONTE TABOR

▲ Im Rückenmark einer Maus haben Stammzellen neues Nervengewebe (blau) gebildet.

BRUCE LYON

◀ Das Gelege des Indianerblesshuhns enthält oft »Kuckuckseier« von der Nachbarin.

VERHALTENSBIOLOGIE

Das Einmaleins im Vogelnest

Kuckucke sind dafür bekannt, ihre Eier in fremde Nester zu legen und von ahnungslosen Pflegeeltern ausbrüten zu lassen. In weniger ausgeprägter Form gibt es Brutparasitismus aber auch bei anderen Vögeln. So legen die in Nordamerika beheimateten Indianerblesshühner *(Fulica americana)* ihre Eier zwar überwiegend ins eigene Nest, scheuen sich aber nicht, nach Möglichkeit auch dem Nachbarn noch das eine oder andere gute Stück unterzuschieben. In den vier Jahren, in denen Bruce Lyon von der Universität von Kalifornien in Santa Cruz das Familienleben der Wasservögel beobachtete, befanden sich durchschnittlich 13 Prozent der Eier in fremden Nestern; 41 Prozent aller Brutpaare wurden mit »Kuckuckseiern« beglückt. Doch das Täuschmanöver gelingt nicht immer. Wo Betrug an der Tagesordnung ist, lernen potenzielle Opfer, auf der Hut zu sein. Tatsächlich können die Blesshühner die untergeschobenen Eier oft anhand der Farbe und Musterung als fremd erkennen. In diesem Fall machen sie kurzen Prozess damit, werfen sie aus dem Nest und legen zum Ausgleich weitere, sodass das Gelege wieder die typische Größe von acht bis zwölf Stück erlangt. Vögel, die nichts merken, rechnen dagegen die fremden Eier mit und legen entsprechend weniger eigene. Demnach betreiben die Blesshühner offenbar Familienplanung nach Adam Riese: Sie zählen ihr Gelege ab und stellen so fest, ob es groß genug ist. *(Nature, 3. 4. 2003, S. 495)*

ASTRONOMIE

Sterbender Stern als Scheinwerfer

NASA / STSCI / AURA

▲ Mit einem x-förmigen Strahlenbündel beleuchtet der sterbende Stern die von ihm ausgeschleuderten Staubringe.

Rund 3000 Lichtjahre von uns entfernt schrumpft ein Stern im Sternbild Schwan zum Weißen Zwerg. Er selbst verbirgt sich hinter einem Nebelschleier, den er geheimnisvoll von hinten anstrahlt. Die Konvulsionen seines Todeskampfes, der nur wenige tausend Jahre dauert, wurden jetzt zufällig vom Hubble-Weltraumteleskop eingefangen. In Anfällen der Selbstzerstörung hat der namenlose Stern alle 100 bis 500 Jahre große Mengen Materie abgestoßen. Sie bilden die konzentrischen Ringe, welche den Nebel – Astronomen als Egg Nebula bekannt – wie die gekräuselte Wasseroberfläche eines von unten beleuchteten Swimmingpools erscheinen lassen. Das Nebelmaterial ist vorwiegend Kohlenstoff, der im Innern des Sterns erzeugt und mit Geschwindigkeiten von bis zu 20 Kilometern pro Sekunde ins All geschleudert wurde. Mittlerweile haben sich die Staubwolken bis zu einem zehntel Lichtjahr von ihrem Ursprungsort entfernt; eines fernen Tages könnten daraus neue Sterne hervorgehen. Entstanden ist das Falschfarbenbild, indem die Polarisation des eintreffenden Lichts gemessen und in Farben umgesetzt wurde. *(The Hubble Heritage Team, 3. 4. 2003)*

MIKROBIOLOGIE

Mit Minidolchen gegen Mikroben

Missliebige Bakterien und Pilze können wir uns in Zukunft vielleicht nach Art der Igel vom Leibe halten. Robert Engel und seine Kollegen von der Stadt-Universität von New York haben mikroskopisch kleine »Dolche« für Kleidungsstücke entwickelt, die Krankheitserreger einfach aufspießen sollen. Ihr »Griff« besteht aus zwei stickstoffhaltigen Kohlenstoffringen. Die »Klinge« ist eine fettliebende Kette aus bis zu 16 mit Wasserstoff gespickten Kohlenstoffatomen. Auf den Kleidungsstücken finden die Miniaturwaffen Halt, weil der Stickstoff des Griffes Hydroxylgruppen aus den Proteinen von Wolle und Seide oder den Kohlenhydraten der Baumwolle verdrängt und sich an ihre Stelle setzt. Erst einmal verankert, sind die Nanodolche für herumschwirrende Mikroben tödlich, denn ihre Stickstoffatome und die fettliebende Klinge ziehen die Lipidmembran von Bakterien und Pilzen an und schlitzen sie auf. Ob die Nanodolche allerdings, wie angedacht, in der US-Armee auch zum Schutz gegen Milzbrand und andere biologische Kampfstoffe eingesetzt werden können, ist bisher noch fraglich. *(Jahrestagung der American Chemical Society 2003, New Orleans)*

ARCHÄOLOGIE

Ältester Gott der Anden

Böse wirkt das kleine Männchen mit seinem weit aufgerissenen Mund und den hervorstechenden, spitzen Reißzähnen. Arme und Beine hat es weit vom Körper weggestreckt, als wolle es sein Gegenüber erschrecken. In der rechten Hand hält es einen Stab, der fast so groß ist wie es selbst. Damit gibt sich das Wesen als »Gott des Stabes« zu erkennen – ein religiöses Symbol, das häufig in frühen südamerikanischen Kulturen auftaucht. Die Zeichnung ist in die Oberfläche eines Kürbisses geritzt, der einst als Schale diente. Jonathan Haas und Winfried Craemer vom Field Museum in Chicago (Illinois) haben ihn zusammen mit Kollegen des Proyecto Arqueológico Norte Chico auf einem Friedhof nahe der Stadt Barranca in Peru ausgegraben. Wie die Radiokarbondatierung ergab, stammt die Grabbeigabe aus der Zeit um 2250 v. Chr. Damit ist sie mehr als tausend Jahre älter als alle bislang bekannten religiösen Zeugnisse aus Südamerika. Popularität erlangte der Gott des Stabes in der Kultur der Chávin (1000 – 200 v. Chr.) und später im Reich der Wari und Tiwanaku (600 – 1000 n. Chr.), deren Glauben er maßgeblich prägte. *(Archaeology, Mai/Juni 2003)*

▼ Der »Gott des Stabes« ziert diese Kürbisschale, die um 2250 v. Chr. in Peru als Grabbeigabe diente.

JILL SEAGARD, FIELD MUSEUM IN CHICAGO (ILLINOIS)

Die Evolution der Hautfarben

Schwarze und weiße Haut entstanden als Anpassung an viel oder wenig Sonne. Die Pigmentierung war stets ein Balanceakt zwischen Vitaminen, die durch UV-Strahlung zerstört oder erzeugt werden. Dies zeigen auch moderne Vitaminmangel-Krankheiten aufgrund der heutigen Mobilität.

Von Nina G. Jablonski und George Chaplin

Die junge Frau leidet an Schuppenflechte. Sie stammt aus Südasien. »Hier in Mitteleuropa bekommen Menschen Ihrer Herkunft leicht zu wenig Sonne«, erfährt sie vom Arzt.

Dass dunkelhäutige Menschengruppen in Äquatornähe leben und hellhäutige in höheren Breiten, führen Anthropologen seit langem auf die Sonnenstrahlung zurück. Allerdings nahmen sie bislang meistens an, die stark pigmentierte Haut sei zum Schutz vor Hautkrebs entstanden. Wir haben eine andere Erklärung gefunden. Vieles deutet darauf hin, dass der Grad der Pigmentierung wesentlich auf einer in der menschlichen Evolution immer wieder austarierten Balance zweier Vitamine beruht. Das eine wird durch UV-Strahlung zerstört, das andere aufgebaut. Beide sind aber wichtig, um Kinder zeugen und gesund zur Welt bringen zu können.

Wir sind die einzigen Primaten mit weitgehend nackter Haut. Schimpansen sehen unter dem Haarkleid hell aus. Da sie sich in den letzten mindestens 7 Millionen Jahren, seit sich unsere Abstammungslinien trennten, vermutlich weniger verändert haben als wir, darf man vermuten, dass auch der letzte gemeinsame Vorfahre hellhäutig war.

Nur die wenigen unbehaarten Körperstellen eines Schimpansen – Gesicht, Hände und Füße, die bei jungen Tieren noch rosa aussehen – werden mit zunehmendem Alter durch Sonnenstrahlung fleckig oder dunkel. So ist anzunehmen, dass die Hominiden erst eine insgesamt dunklere Haut bekamen, als ihr Haarkleid verschwand. Doch wann verloren unsere Ahnen ihr Fell?

Ihre fossilen Skelette vermitteln ein recht gutes Bild ihrer Lebensweise und Verhaltensmöglichkeiten. »Lucy« und ihre Zeitgenossen schlugen sich vor gut 3 Millionen Jahren vermutlich ähnlich durch wie heutige Savannenprimaten: Sie verbrachten den Großteil des Tages mit Nahrungssuche in offenem Gelände und zogen sich zur Nacht auf Bäume zurück. An einem Tag legten diese aufrecht gehenden Vormenschen, die Australopithecinen, wohl kaum viel mehr als fünf Kilometer zurück.

Der Urmensch war schwarz

Vor 1,6 Millionen Jahre lebte man schon ganz anders. Aus dieser Zeit stammt das Skelett des »Turkana-Jungen«, eines groß gewachsenen Jugendlichen. Er war ein *Homo ergaster* und damit schon ein Angehöriger unserer eigenen Gattung *Homo*. Mit seinen langen Beinen konnte der Junge sicherlich kräftig ausschreiten. Frühmenschen wie er legten wahrscheinlich weite Strecken zurück.

Bei so viel körperlicher Anstrengung wuchs in der offenen Savannenlandschaft allerdings die Gefahr eines Hitzschlags. Vor allem das Gehirn durfte nicht überhitzen. Die Lösung bei den Frühmenschen war Kühlung des Körpers und des zirkulierenden Blutes durch kräftiges Schwitzen. Die Zahl der Schweißdrüsen stieg an, und damit der Schweiß schnell verdunstete und Kühlung brachte, musste die Behaarung zurückgehen – so zeigte Peter Wheeler von der John Moores University in Liverpool auf.

Jetzt aber traf die Sonne auf die nackte Haut. Besonders der kurzwellige Anteil ihrer Strahlung kann ungeschützte Hautpartien verbrennen, die Schweißdrüsen zerstören und tiefer liegenden Zellen schwer zusetzen. Dabei entstehen DNA-Schäden, welche die Zellen zwar

SUPERBILD

Die Hautfarben der Menschen haben sich immer wieder allmählich an die Sonneneinstrahlung ihres jeweiligen Lebensraums angepasst.

meist reparieren, die sich unter Umständen aber bis zu Hautkrebs auswachsen (siehe »Sonnenbrand und Hautkrebs«, SdW 6/1997, S. 74). Unbehaarte Hautpartien von Schimpansen enthalten Melanocyten. Unter UV-Strahlung erzeugen diese pigmentbildenden Zellen dunkle Pigmente, die Melanine – große Moleküle, die zwei Schutzfunktionen erfüllen: Sie fangen die verheerenden UV-Strahlen ab und neutralisieren die giftigen freien Radikale, die bei Schäden durch solche Strahlung entstehen.

Diese Mechanismen gewannen beim Menschen wesentlich an Bedeutung. Die gelb- oder rotbraunen bis schwarzen Melanine sind für ihn ein natürliches Sonnenschutzmittel. Hierfür gibt es viele Anhaltspunkte. So sind hellhäutige Menschen, die in Regionen mit starker Sonneneinstrahlung leben – etwa Mitteleuropäer in Australien – besonders hautkrebsgefährdet. Insbesondere aber erkranken Menschen mit *Xeroderma pigmentosum* viel öfter an Hautkrebs. Bei dieser erblichen »Mondscheinkrankheit« fehlen den Zellen Reparaturmechanismen für UV-Schäden, so dass jede Sonnenexposition gefährlich ist. Meist handelt es sich zwar um vergleichsweise gut behandelbare Plattenepithel- und Basalzellenkarzinome. Seltener treten die besonders gefährlichen malignen Melanome auf, die insgesamt vier Prozent der Hautkrebsfälle ausmachen und vor allem Weiße heimsuchen. Trotzdem verläuft die Krankheit oft schon früh tödlich.

Wegen dieser und vieler ähnlicher Befunde verbreitete sich die Ansicht, tropische Bevölkerungen hätte ihre dunkle Haut vor allem zum Schutz vor Hautkrebs entwickelt. Dies ist allerdings evolutionsbiologisch betrachtet nicht einsichtig. Meist erscheinen solche Karzinome nämlich nicht vor dem mittleren Erwachsenenalter, wenn Menschen bereits einige Kinder haben können und früher sicherlich auch meist hatten. Evolutionsanpassungen entstehen aber nur, wenn sie sich auf die Fortpflanzung günstig auswirken. Ein Hautkrebs hätte eher selten die eigenen Fortpflanzungschancen deutlich gemindert. Für die Pigmentbildung in der Haut musste es zumindest weitere wichtige Gründe geben. ▷

Zufällig stieß eine von uns (Jablonski) 1991 auf eine Publikation aus dem Jahr 1978 von Richard F. Branda und John W. Eaton, die jetzt an der Universität von Vermont in Burlington beziehungsweise an der Universität Louisville (Kentucky) arbeiten. Die beiden Forscher haben entdeckt, dass hellhäutige Personen ungewöhnlich niedrige Konzentrationen an Folat (Folsäure) im Blut aufwiesen, nachdem sie sich starkem künstlichen Sonnenlicht ausgesetzt hatten – das bei ungeschützter Haut bis in die feinen oberflächennahen Blutgefäße eindringt. Wie Branda und Eaton außerdem nachwiesen, sinkt der Gehalt dieses lebenswichtigen B-Vitamins im menschlichen Blutserum binnen einer Stunde auf die Hälfte, wenn man das Serum mit künstlichem Sonnenlicht bestrahlt.

Was das für die Fortpflanzung bedeuten kann – und in der menschlichen Evolution bedeutet haben mag –, wurde uns plötzlich klar, als wir von einer Studie von Fiona J. Stanley und Carol Bower an der University of Western Australia in Nedlands aus den späten 1980er Jahren erfuhren. Die beiden Wissenschaftlerinnen untersuchten die Ursachen für angeborene Fehlbildungen im Bereich des Rückgrats und Rückenmarks, etwa für den so genannten offenen Rücken (Wirbelspalt, *Spina bifida*). Kinder mit dieser schweren Missbildung, bei der Abschnitte des Rückenmarks frei liegen oder zumindest nicht von Wirbeln rundum geschützt sind, haben oft schwere Körperbehinderungen und leiden vielfach auch an einem Wasserkopf. Stanley und Bower erkannten, dass bei Folsäuremangel in der Schwangerschaft das Risiko für solche Fehlentwicklungen steigt. Viele Studien weltweit haben den Zusammenhang inzwischen bestätigt. Auf Folsäuremangel insbesondere in der frühen Schwangerschaft sollen etwa auch Lippen-Kiefer-Gaumen-Spalten zurückgehen können. Schwangeren und Frauen mit Kinderwunsch wird daher heute empfohlen, Folsäure-Präparate einzunehmen. In der Nahrung ist das B-Vitamin insbesondere etwa in Eigelb, Leber, Weizenkeimen und in Blattgemüse (Spinat, Endivien, Broccoli) enthalten.

Wir stießen bald auf weitere Hinweise, dass Folsäure auch in vieler anderer Hinsicht eine wichtige körperliche Bedeutung hat. Zellen benötigen die Substanz bei der Teilung zur Synthese neuer DNA. Wo immer Zellen sich schnell vermehren, ist darum Folsäure unabdingbar, so auch bei der Bildung von Spermien. Dies wurde bei Ratten und Mäusen nachgewiesen. Wenn man durch einen chemischen Wirkstoff bei männlichen Nagern einen Folsäuremangel erzeugt, ist ihre Spermienproduktion gestört und die Tiere werden unfruchtbar. Vergleichbare Studien am Menschen gibt es zwar nicht, aber Wai Yee Wong und seine Kollegen vom Universitätsklinikum in Nijmegen in den Niederlanden berichteten kürzlich, dass sich die Spermienzahl von Männern mit verminderter Zeugungsfähigkeit unter Umständen steigern lässt, wenn sie Folsäure erhalten.

IN KÜRZE

- Die **frühen Hominiden** bekamen dunkle Haut, als sie die dichte Körperbehaarung verloren – eine Anpassung an ihr Leben in der heißen Savanne. Allerdings entstand die Pigmentierung nicht zum Schutz vor **Hautkrebs**.
- Vielmehr schützt dunkle Haut vor **Folsäureabbau** durch UV-Strahlung. Andernfalls drohen Unfruchtbarkeit sowie kindliche Missbildungen.
- Umgekehrt muss die Haut in höheren Breiten gerade so hell sein, dass genügend UV-Strahlen für die **Vitamin-D-Synthese** eindringen. Für Schwangerschaft und Stillzeit kann das eine heikle Gratwanderung bedeuten.
- Heute leben viele Menschen nicht mehr in den Gegenden, an die ihre Hautfarbe angepasst ist. **Ältere Kulturen** gleichen die damit verbundenen gesundheitlichen Gefahren durch Verhalten aus. Bei modernen **Migranten** fehlt oft solches Wissen.

Sonne vernichtet Folsäure

Wir vermuten also, dass in der menschlichen Evolution dunkle Haut schon deswegen entstand, um die Folsäurereserven des Körpers vor UV-Strahlung zu schützen (siehe Kasten rechts). Zu unserer These passt auch ein 1996 veröffentlichter Bericht des argentinischen Kinderarztes Pablo Lapunzina. Drei an sich gesunde junge Frauen, die er betreute, gebaren Kinder mit *Spina bifida*. In den ersten Schwangerschaftswochen hatten sie Solarien besucht.

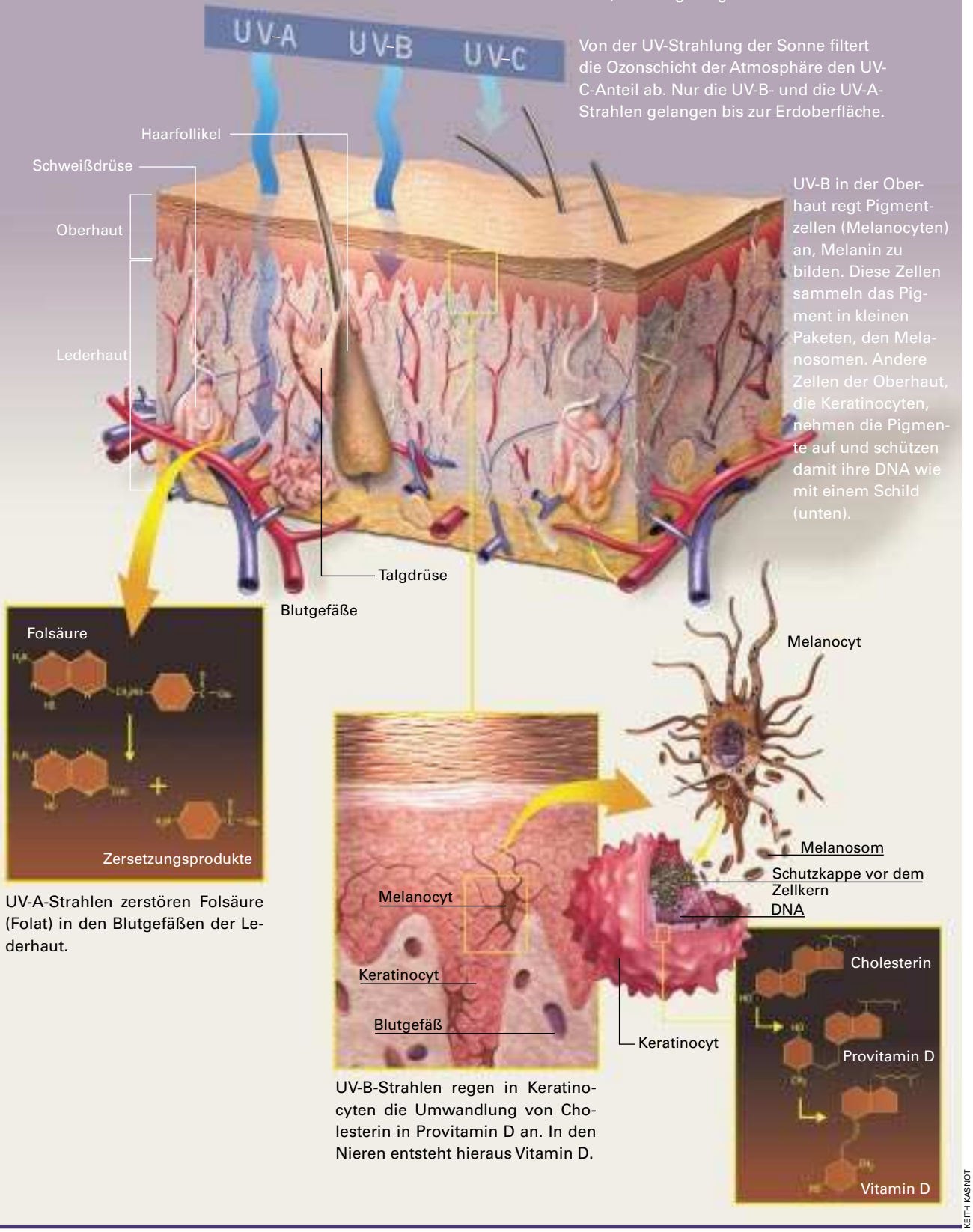
Zurück zu unseren Vorfahren. Als der *Homo sapiens* vor einigen hunderttausend Jahren in Afrika entstand, muss er dunkelhäutig gewesen sein, denn sicherlich trugen die Menschen damals längst kein Fell mehr. So hatten sie sich an das heiße Klima und die starke UV-Strahlung in Äquatornähe angepasst. Auch der so genannte moderne Mensch, der dort vor 120 000 bis 100 000 Jahren auftrat, muss demnach dunkel ausgesehen haben (siehe auch »Der Ursprung lag in Afrika«, SdW 3/2003, S. 38).

Doch bald zogen moderne Menschen vom afrikanischen Kontinent fort und besiedelten auch Regionen, wo die UV-Strahlung über das Jahr gesehen und besonders in den Wintermonaten deutlich

Die Haut unter UV-Beschuss

Segen und Gefahr der Sonnenstrahlung

Die Pigmentierung der Haut ist physiologisch ein Balanceakt. Gegenüber der ultravioletten Strahlung darf sie weder zu dunkel noch zu hell sein. Denn UV-Strahlen veranlassen die Produktion von Vitamin D, zersetzen aber Folsäure. Außerdem verbrennt UV-Strahlung die Haut und schädigt die Erbsubstanz ihrer Zellen, was langfristig Krebs verursachen kann.



Von der UV-Strahlung der Sonne filtert die Ozonschicht der Atmosphäre den UV-C-Anteil ab. Nur die UV-B- und die UV-A-Strahlen gelangen bis zur Erdoberfläche.

UV-B in der Oberhaut regt Pigmentzellen (Melanocyten) an, Melanin zu bilden. Diese Zellen sammeln das Pigment in kleinen Paketen, den Melanosomen. Andere Zellen der Oberhaut, die Keratinocyten, nehmen die Pigmente auf und schützen damit ihre DNA wie mit einem Schild (unten).

UV-A-Strahlen zerstören Folsäure (Folat) in den Blutgefäßen der Lederhaut.

UV-B-Strahlen regen in Keratinocyten die Umwandlung von Cholesterin in Provitamin D an. In den Nieren entsteht hieraus Vitamin D.

KEITH KASNOT

Gut und ungenügend angepasste Haut

Folgen von Migration

Über Jahrtausende konnte sich die Hautpigmentierung meist auf die lokalen Verhältnisse einstellen. Wenn dagegen Menschengruppen in einem Gebiet noch nicht sehr lange leben, drohen Hautschäden und Vitaminmangel-Krankheiten.

seit langem ansässig | **vor kurzem eingewandert**

Südafrika: etwa 20. bis 30. Breitengrad

PETER JOHNSON, CORBIS

Hottentotte

BARBARA BANNISTER, GALLO IMAGES / CORBIS

Zulu: seit 1000 Jahren

Australien: etwa 10. bis 35. Breitengrad

PENNY TWEEDIE, CORBIS

Aborigine

DAVID MC LAIN, AURORA

Europäerin: seit 200 Jahren

am Roten Meer: etwa 15. bis 30. Breitengrad

ERIC WEATHER, LONELY PLANET IMAGES

Sudanese

WAYNE EASTEP, GETTY IMAGES

Araber: seit 2000 Jahren

Indien: etwa 10. bis 30. Breitengrad

ROGER WOOD, CORBIS

Bengalin

JEREMY HORNER, CORBIS

Tamilin: seit 100 Jahren

▷ geringer ist. Dort wurde der dicke Sonnenschutz durch viele dunkle Pigmente nicht nur überflüssig, sondern er dürfte sich sogar als nachteilig erwiesen haben. Dunkle Haut enthält in den äußeren Schichten so viel Melanin, dass in gemäßigten Breiten nur noch sehr wenig UV-Strahlung tief eindringt. Vor allem UV-B, das kurzwelliger ist als UV-A, wird größtenteils abgefangen.

Warum Haut hell werden musste

Nun hat UV-B zwar überwiegend gefährliche, unerwünschte Wirkungen, doch diese Strahlung erfüllt auch eine unverzichtbare Aufgabe: Sie setzt in der Haut die Synthese von Vitamin D in Gang, das beim Calcium-und Phosphat-Stoffwechsel und damit insbesondere beim Knochenaufbau mitwirkt. In der Haut entsteht zunächst eine Vorstufe des Vitamins, die in den Nieren zu Vitamin D umgebaut wird (siehe Kasten Seite 41). Unter der starken Sonnenstrahlung der Tropen nehmen dunkelhäutige Menschen immer noch genügend UV-B zur Vitamin-D-Synthese auf. Doch in höheren Breiten wäre die Dosis bei dunkler Haut die meiste Zeit des Jahres zu gering. Zum Ausgleich wurde die Hautfarbe heller.

Die These, dass die Pigmentierung wegen des Vitamins D zurückging, brachte 1967 W. Farnsworth Loomis von der Brandeis-Universität in Waltham (Massachusetts) auf. Er erkannte einen Zusammenhang mit der Fortpflanzung und den Immunfunktionen. Vitamin D ist zur Calciumaufnahme aus dem Darm nötig. Ohne diesen Mechanismus kann sich das Skelett nicht normal entwickeln, da Knochensubtanz großenteils aus diesem Mineral besteht. Für sehr viele grundlegende physiologische Prozesse ist Calcium unabdingbar. Auch das Immunsystem ist auf ausreichend Calcium angewiesen.

Diese Zusammenhänge haben Michael Hollick von der Universität Boston (Massachusetts) und seine Kollegen in den letzten beiden Jahrzehnten durch ihre medizinischen Studien weiter untermauert. Sie zeigten auch, dass das Sonnenlicht in höheren Breiten im Winter für die Vitamin-D-Synthese selbst für hellhäutige Menschen zu wenig UV-B-Strahlung enthält. In der Stadt Boston an der amerikanischen Ostküste etwa kann helle Haut offenbar erst wieder ab etwa Mitte März Nachschub bilden. Boston liegt am 42. nördlichen Breitengrad, etwa auf der Höhe Roms und Nordspaniens.

(Die süddeutsche Stadt Freiburg liegt auf dem 48., Rostock an der Ostsee am 54. Breitengrad.)

Wir mussten lange suchen, bis wir eine Quelle fanden, in der die UV-Strahlungsintensitäten der einzelnen Regionen weltweit zusammengestellt waren. Erst 1996 half uns Elisabeth Weatherhead von der Universität von Colorado in Boulder weiter. Sie vermittelte uns Daten von Messungen der UV-Strahlung am Erdboden, die ein Nasa-Satellit zwischen 1978 und 1993 für Karten der Ozon-Werte aufgenommen hatte. Hieraus ermittelten wir die UV-Strahlung über die Gebiete der Erde. Daraus errechneten wir anhand bekannter Mindestwerte für Menschen verschiedener Hautfarben, wo und wann genug UV-B-Strahlung die Erde erreicht, damit in unserer Haut die Vitamin-D-Synthese einsetzt.

Grob könnte man für hellhäutige Menschen die Erdoberfläche in drei Vitamin-D-Zonen einteilen. Unter anderem hängt die Strahlungsintensität dabei auch von anderen geografischen Faktoren, wie der Höhe über dem Meeresspiegel, ab. Auf Höhe der Tropen, grob etwa bis zum dreißigsten nördlichen und südlichen Breitengrad, ist die UV-B-Dosis das ganze Jahr über hoch genug. Weiter nach Norden (beziehungsweise auf der Südhalbkugel nach Süden) erreichen die UV-B-Werte für zunehmend längere Zeitphasen nicht die nötige Intensität. Jenseits des 30. Breitengrads (auf Höhe Nordafrikas), in der zweiten Zone, ist dies zunächst ein Wintermonat, weiter nördlich fast ein halbes Jahr. In der dritten Zone, die etwa beim 50. Breitengrad beginnt (Höhe Frankfurt), dauert diese Phase ein halbes Jahr und länger. Übers Jahr gesehen müssten die Menschen nördlich etwa des 45. Breitengrades darum an Vitamin-D-Mangelerscheinungen leiden, sofern sie dies nicht durch die Nahrung kompensieren.

Dieses Strahlungsmuster dürfte auch ein Grund sein, wieso Menschen des hohen Nordens und auch schon des nördlichen Mitteleuropa oft gar nicht braun werden: Ihre Haut sollte stets so viel Sonne wie möglich einfangen können. Die Bevölkerungen mittlerer Breiten haben dagegen im Winter regelmäßig einen fahleren Teint als im Sommer. Ihre Haut passt sich den Jahreszeiten an: Im Winter nutzt sie das wenige Sonnenlicht, im Sommer schützt sie sich vor zu viel UV-Strahlung. In Äquatornähe wiederum ist die Strahlung so stark, dass auch ein kontinuierlicher Pigmentschutz noch eine ausreichende Vitamin-D-Produktion ermöglicht.

Die etwas hellere Haut einer Frau: Risiko zum Wohl des Kindes

Nicht alle Bevölkerungen passen in dieses Schema. So sind in manchen arktischen Gebieten auch Menschengruppen ansässig, deren Teint für diese Breiten nach unserem Modell eigentlich zu dunkel ist. Dazu gehören die Inuit (Eskimo) Alaskas und Nordkanadas. Ihre relativ dunkle Haut könnte sich zum einen daher erklären, dass sie erst vor kaum 5000 Jahren aus Asien nach Nordamerika einwanderten. Zum anderen bestand für sie offenbar kein sehr großer Zwang, hellhäutiger zu werden. Die Inuit essen traditionell sehr viel Fisch und andere Meerestiere, eine besonders Vitamin-D-reiche Kost.

Unser Modell könnte auch ein anderes Phänomen der Hautfarben erklären, das Anthropologen schon früher auffiel: Generell haben in einer Bevölkerung Frauen einen etwas helleren Teint als Männer. Nach den vorliegenden Daten ist die weibliche Haut um drei bis vier Prozent heller. Manche Forscher vermuten, dass dies von einer sexuellen Selektion herrührt, nämlich von einer Vorliebe der Männer für Frauen mit eher heller Haut. Dieser Zusammenhang mag durchaus mitspielen, doch dürfte der eigentliche Hintergrund ursprünglich ein anderer gewesen sein. Während Schwangerschaft und Stillzeit benötigen Frauen für das Kind besonders viel Calcium und somit besonders viel Vitamin D, damit sie möglichst viel des Minerals aus der Nahrung erschließen. Vielleicht ist ihre etwas hellere Haut eine Anpassung, damit etwas mehr UV-B in die Haut gelangt. In Gegenden mit starker UV-Strahlung erscheint das als ein heikler Balanceakt der Evolution. Einerseits darf nicht zu viel UV-Strahlung eindringen, um die Leibesfrucht nicht zu gefährden. Andererseits muss aber auch die Vitamin-D-Synthese zum Wohl des Kindes gewährleistet sein.

Solange es den anatomisch modernen Menschen gibt und er in der Welt herumzog, also seit mindestens 100 000 Jahren, passte sich sein Teint vermutlich immer wieder der regionalen Sonneneinstrahlung an. Am längsten hatten dazu alte afrikanische Bevölkerungen Zeit, denn auf ihrem Kontinent war der moderne *Homo sapiens* entstanden. Danach erst kamen moderne Menschen in verschiedene Regionen Asiens. Schließlich erreichten sie vor einigen zehntausend Jahren auch Australien, Europa und als Letztes Amerika. Teilweise ist nachvollziehbar, wie ihre Hautfarbe sich allmählich durch die Ortswechsel gen Norden oder wiederum Süden immer neu änderte. Man muss dabei allerdings auch berücksichtigen, dass diese Menschen sich bereits mit Kleidung und Behausungen vor den Elementen schützten, somit also den lokalen Verhältnissen nicht mehr uneingeschränkt ausgesetzt waren. Mancherorts kompensierten sie wohl auch ▷

Drei UV-Zonen

Die günstigste Hautfarbe

Die Strahlung
In tropischen Regionen gewährleistet die UV-Strahlung das ganze Jahr über eine Vitamin-D-Synthese. In Südeuropa ist sie dafür während einiger Wintermonate zu gering, in Mitteleuropa während des ganzen Winterhalbjahres.

Das Modell
Die meisten Bevölkerungen der Alten Welt sind etwa so dunkel oder hell, wie das Modell voraussagt. Die ursprünglichen Bewohner Amerikas haben oft eine zu helle Haut. Wahrscheinlich leben sie in den jetzigen Verbreitungsgebieten noch nicht sehr lange.

Verteilung der UV-Strahlung

Postulierte optimale Pigmentierung der Haut

SARA CHEN

▷ den Vitamin-D-Mangel mit Nahrung, ähnlich wie die Inuit. Das Essen, die Kleidung sowie überdachte Wohnungen bestimmten vermutlich mit, wie rasch und wie stark sich die Hautpigmentierung jeweils evolutionär veränderte.

Auch in Afrika selbst mit seinen vielen unterschiedlichen Regionen lassen sich solche Anpassungen noch heute gut erkennen. So gab es offenbar schon früh eine Reihe von Wanderbewegungen fort von äquatornahen Gebieten nach Süden. Zum Beispiel leben die Vorfahren der Khoisan – der Hottentotten und Buschleute – bereits seit langer Zeit im südlichen Afrika. Sie haben deutlich hellere Haut als Äquatorialafrikaner. Dies dürfte eine Anpassung an die geringere UV-Strahlung in Südafrika sein.

Interessanterweise sind die heutigen südafrikanischen Bevölkerungsgruppen, die Bantu-Sprachen sprechen, viel dunkler als die Khoisan. Historisch ist erwiesen, dass sie erst vor relativ kurzer Zeit aus äquatornahen Gebieten Westafrikas in die Region kamen. Wahrscheinlich ist das höchstens tausend Jahre her, eine nach evolutionären Maßstäben sehr kurze Zeitspanne.

Besonders in jüngerer Zeit dürften auch kulturelle Züge stark beeinflusst haben, ob Hautfarben sich anpassen mussten oder nicht. Beispielsweise leben beim Roten Meer auf afrikanischer Seite sehr dunkle Menschen, auf der arabischen Halbinsel deutlich hellere. Die Bevölkerungen auf der Westseite sprechen nilosaharische Sprachen und leben in der Region wahrscheinlich seit 6000 Jahren und länger. Sie sind ausgesprochen schlank und langgliedrig, also schon körperlich hervorragend für das heiße Klima und die starke Einstrahlung dieser Gegend gerüstet.

Hautfarbe kein Rassemerkmal

Dagegen leben die Bauern und Hirten des Ostufers, deren Vorfahren aus dem Norden stammten, dort erst seit etwa 2000 Jahren. Eigentlich sind diese Nachfahren der ersten Araber für diese Breiten zu hell. Sie gleichen das aber durch dichte Kleidung aus, die sie fast völlig vor der Sonne schützt, und sie benutzen Zelte, die sie mit sich führen. Es sieht so aus, als würde die kulturelle Anpassung gegenüber der biologischen ausgeprägter, wenn eine Population in einem Gebiet noch nicht lange zu Hause ist.

In unserer Zeit allerdings erfolgt die kulturelle Umstellung auf die Sonnenverhältnisse in einem neuen Land häufig nicht schnell genug, vielfach wohl aus Unwissen. Die Folge können Erkrankungen sein, welche die betreffenden Menschengruppen bislang wenig kannten oder die als überwunden galten. Hellhäutige ehemalige Nordeuropäer bezahlen Sonnenbäder in Florida oder Nordaustralien zunehmend mit vorzeitiger Hautalterung und sogar Hautkrebs. Wie viele Fehlgeburten oder Fehlbildungen bei Neugeborenen auf einen sonnenbedingten Folsäuremangel zurückgehen, wissen wir nicht. Umgekehrt leiden dunkel pigmentierte Menschen aus Südasien oder Afrika im Norden auffallend häufig an Rachitis und anderen hier fast schon vergessenen Vitamin-D-Mangel-Erscheinungen, wie in Großbritannien, besonders in dessen Norden, viele Inder.

Früher haben Wissenschaftler die Menschen auch anhand der Hautfarbe in Rassen eingeteilt. Dieser Ansatz gilt heute als überholt. Die verschiedenen Farbnuancen spiegeln nur Anpassungen an unterschiedliche Umwelten. In evolutionären Zeiträumen gemessen kann sich die Pigmentierung schnell verändern. Deswegen gehört die Hautfarbe zu den am wenigsten aussagekräftigen Merkmalen, um Verwandtschaften zwischen Menschengruppen zu erkennen. ◁

Nina G. Jablonski hat den Irvine-Lehrstuhl an der Kalifornischen Akademie der Wissenschaften in San Francisco und ist Kuratorin für Anthropologie. Sie forscht über Umweltanpassungen der Primaten. Ihr Mann **George Chaplin** arbeitet am selben Institut. Sein Spezialgebiet sind geografische Trends der biologischen Vielfalt.

The Evolution of Human Skin Coloration. Von Nina G. Jablonski und George Chaplin in: Journal of Human Evolution, Bd. 39, Heft 1, 1. Juli 2000, S. 57.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOREN UND LITERATURHINWEIS

Das expandierende Universum

Nach Jahren der Ungewissheit haben Astronomen genügend Datenmaterial gesammelt, um die Expansionsbewegung des Kosmos, beschrieben durch die so genannte Hubble-Konstante, berechnen zu können.

Von Wendy Freedman

Vermutlich bin ich die einzige Astronomin, die jemals in einem Käfig mitten im Strahlengang eines Großteleskops auf dem Gipfel des 4200 Meter hohen Mauna Kea auf Hawaii gefangen war. Mein Missgeschick ist zwanzig Jahre her. Damals saßen die Astronomen während ihrer Beobachtungen noch nicht in klimatisierten Computerräumen, sondern in sehr kleinen Kabinen im Primärfokus der riesigen Spiegelteleskope. Die langen Winternächte waren unerträglich kalt, aber wir genossen von dieser Position aus den spektakulären Anblick des Sternenhimmels, während wir Bilder und Spektren von fernen Himmelskörpern aufzeichneten.

Am Ende einer solchen Nacht geschah es: Wegen einer fehlerhaften Position des Fernrohrs blieb ein Fahrstuhl stecken – und damit war es mir unmöglich, die Beobachterkabine zu verlassen. Das bedeutete mehr als nur eine kleine Unbequemlichkeit: Immerhin befand sich die nächste Toilette zwölf Meter unterhalb von mir. Und ich war höchst unbequem in zwei dicke Schneeanzüge verpackt. Es dauerte sieben Stunden, bis endlich eine Gruppe von Technikern eintraf – sie mussten erst den Berg hinauffahren, und unterwegs hatten sie noch eine Reifenpanne. Meine Retter kletterten an der Seite der Kuppel hoch und bekamen den eingeklemmten Fahrstuhl endlich mit ei-

Die Spiralgalaxie NGC 4414 ist rund 62 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt und strebt mit einer Geschwindigkeit von 1400 Kilometern pro Sekunde weiter von uns fort. Alle Galaxien zeigen eine solche Fluchtbewegung, die umso schneller erfolgt, je größer die Entfernung ist. Astronomen haben mithilfe des Hubble-Weltraumteleskops im Laufe von acht Jahren umfangreiches Datenmaterial über die Entfernungen und Bewegungen der Galaxien gesammelt, um daraus die allgemeine Expansion des Weltalls zu bestimmen, die durch wenige Parameter – darunter die so genannte Hubble-Konstante – beschrieben wird.

ner Brechstange wieder frei. Warum nur nimmt ein Wissenschaftler solche Unannehmlichkeiten auf sich?

Als beobachtende Kosmologin kann ich versichern, dass der Erfolg die gelegentlichen Unbequemlichkeiten mehr als wettmacht. Das Ziel ist anspruchsvoll: Meine Kollegen und ich wollen herausfinden, wie das Universum entstanden ist und wie es sich entwickelt hat. Unsere langwierigen Beobachtungen und Experimente liefern uns letztlich wichtige Zahlen: die Werte der so genannten kosmologischen Parameter. Diese Zahlen können uns wichtige Dinge über den Kosmos sagen, nämlich wie viel Materie es gibt, ob der Raum gekrümmt oder flach ist und ob das Universum für alle Zeiten expandiert oder irgendwann wieder in sich zusammenstürzt. Um die Bedeutung dieser Zahlen zu verstehen, müssen wir einen kleinen Ausflug in die Geschichte machen.

Eine Zahl beschreibt das Universum

Die wichtigste Grundlage der modernen Kosmologie ist die Allgemeine Relativitätstheorie von Albert Einstein. Diese Theorie der Gravitation beschreibt das universelle Verhalten von Materie, Energie, Raum und Zeit. Einige Lösungen dieser Gleichungen – vor allem jene, die der russische Mathematiker Alexander Friedmann in den 1920er Jahren entdeckt hatte – weisen darauf hin, dass das Universum in einem extrem heißen und dichten »Urknall« entstanden ist und sich seitdem immer weiter ausdehnt. Die so genannte Friedmann-Gleichung beschreibt die dynamische Entwicklung des Universums in Abhängigkeit von seiner Dichte und Geometrie (siehe Kasten auf Seite 52). Wir können die Friedmann-Gleichung aber nur anwenden, wenn wir etwas über die Parameter wissen, die in ihr enthalten sind. Dies sind die Hubble-Konstante H, welche die Expansionsrate des Kosmos angibt, die Massendichte Ω_m im Universum und die Raumkrümmung Ω_k. Diese Größen ergeben sich nicht als Lösungen der Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie, sondern wir müssen sie messen.

Einer der Ersten, der versuchte, solche Messungen durchzuführen, war der amerikanische Astronom Edwin Hubble. Seine Beobachtungen zeigten 1929 tatsächlich, dass Galaxien sich mit umso größerer Geschwindigkeit von uns fort zu bewegen scheinen, je größer ihre Entfernung von uns ist – so, wie es bei einer Expansion des Raumes zu erwarten ist. Dieser Zusammenhang zwischen Entfernung und Fluchtgeschwindigkeit ist nun als Hubble-Effekt bekannt. Für die heutige Expansionsrate des Kosmos – H_0 genannt – fand Hubble einen Wert von 500 Kilometern pro Sekunde pro Megaparsec. Das Parsec ist eine von Astonomen genutzte Entfernungseinheit: Ein Parsec entspricht 3,26 Lichtjahren, ein Megaparsec sind eine Million Parsec. Aus mehreren Gründen lag Hubble mit seinen Messungen noch weit daneben – aber selbst vor wenigen Jahren schwankten die Ergebnisse der Kosmologen noch zwischen 50 und 100. (Aus Bequemlichkeit werden die Einheiten meist weggelassen.)

Dieser Mangel an Genauigkeit war ärgerlich. Denn H_0 ist für die Kosmologen der Schlüssel zur Bestimmung sowohl der Größe als auch des Alters unseres Universums. Der große Bereich möglicher Werte für H_0 führt zu einer inakzeptabel großen Spanne von 10 bis 20 Milliarden Jahren für das Alter der Welt.

Doch in den letzten Jahren hat sich die Situation geändert. Neue Technologien erlauben es uns, weiter als je zuvor in die Tiefen des Alls vorzudringen – und damit lassen sich auch H_0 und einige andere kosmologische Parameter mit beständig wachsender Genauigkeit bestimmen. Einen wesentlichen Durchbruch brachte das 1990 gestartete Hubble-Weltraumteleskop. Die genaue Bestimmung von H_0 war sogar einer der Hauptgründe für den Bau dieses erdumkreisenden Observatoriums. Über einen Zeitraum von acht Jahren, von 1993 bis 2001, waren dreißig Astronomen an diesem Projekt beteiligt, darunter auch ich. Rund eintausend Stunden der kostbaren Beobachtungszeit des Hubble-Weltraumteleskops wurden dafür aufgewendet.

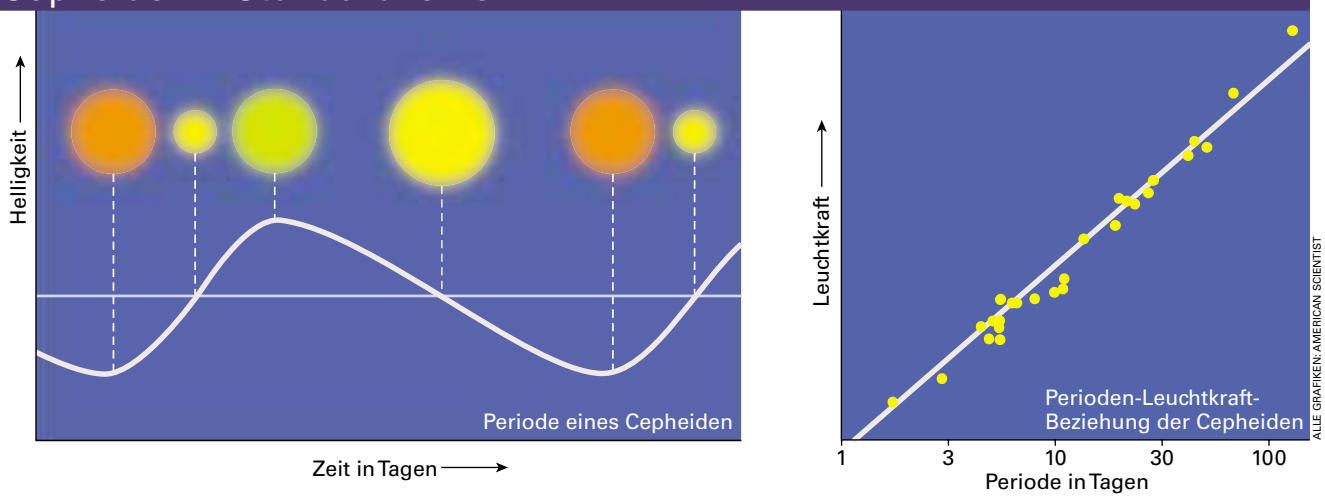
Simples Prinzip – diffizile Messung

Eigentlich sollte die Hubble-Konstante recht einfach zu ermitteln sein: Man muss nur die Entfernung und die Fluchtgeschwindigkeit einer Galaxie messen. In der Praxis ist es allerdings alles andere als einfach, auf kosmischen Skalen Entfernungen zu bestimmen. Und selbst die eigentlich recht simple Messung von Geschwindigkeiten wird dadurch erschwert, dass viele Galaxien nicht allein im Raum stehen: Durch die Schwereanziehung benachbarter Sternsysteme wird ihre Bewegung beeinflusst. Die aus der Wechselwirkung resultierende Eigenbewegung gilt es säuberlich von der kosmischen Fluchtbewegung (auch Hubble-Fluss genannt) zu unterscheiden.

Wir berechnen die Geschwindigkeit einer Galaxie aus der beobachteten Verschiebung der Linien in ihrem Spektrum (das ist die Intensitätsverteilung der elek- ▷

NASA, HUBBLE-HERITAGETEAM, STSCI/AURA, WENDY FREEMAN

Cepheiden – Standardkerzen im All



Cepheiden sind massereiche Sterne, die in ihrer Entwicklung eine instabile Phase erreicht haben. Die äußere Atmosphäre dieser Sterne pulsiert regelmäßig, indem sie Größe und Farbe verändert (links). Dadurch schwankt die Helligkeit (oder Leuchtkraft) regelmäßig mit Perioden von zwei bis zu über hundert Tagen. Die Helligkeit eines Cepheiden hängt dabei mehr von seiner Farbe als von seiner Größe ab. Hellere Cepheiden zeigen längere Perioden.

Der Zusammenhang zwischen der Leuchtkraft und der Periode ist linear (rechts) und erlaubt den Astronomen daher, die Leuchtkraft des Sterns aus seiner Periode zu berechnen. Weil die Helligkeit quadratisch mit der Entfernung abnimmt, können die Forscher dann die absolute Entfernung der Cepheiden bestimmen. Die Entfernungsskala der Cepheiden lässt sich aus der Beobachtung solcher Sterne in der Großen Magellanschen Wolke, einem Begleiter des Milchstraßensystems, kalibrieren. Die Entfernung der Großen Magellanschen Wolke wiederum ergibt sich aus der Kombination mehrerer Methoden.

▷ tromagnetischen Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge). Das Licht von Galaxien, die sich von uns entfernen, wird durch den Doppler-Effekt gedehnt. Die Spektrallinien erscheinen dadurch zu größeren Wellenlängen hin verschoben – »rotverschoben«, wie die Astronomen sagen. Je größer diese Rotverschiebung, desto höher die Geschwindigkeit der Galaxie. Da die Fluchtgeschwindigkeit durch die Expansion des Raumes mit der Entfernung anwächst, nimmt der Einfluss der Eigenbewegungen auf unsere Messungen mit der Entfernung ab. Wir können die Unsicherheiten noch weiter reduzieren, indem wir nicht eine, sondern viele Galaxien vermessen, die über den gesamten Himmel verteilt sind. Auf diese Weise sollte sich der Einfluss der Eigenbewegungen herausmitteln.

Die kosmische Entfernungsleiter

Wie aber messen die Astronomen nun die Entfernung der Galaxien von der Erde? Wegen der immensen Ausdehnung des Universums gibt es kein allgemein gültiges Verfahren. Jede Methode eignet sich nur für einen bestimmten Entfernungsbereich. In der Gesamtheit sprechen die Astronomen von der »kosmischen Entfernungsleiter«, da sie sich durch Aneinanderreihen verschiedener Verfahren gewissermaßen von Sprosse zu Sprosse ins All hinaushangeln.

Die Entfernung der nächsten Sterne lässt sich direkt über die trigonometrische Parallaxe bestimmen (siehe Spektrum der Wissenschaft 2/2000, S. 50). Als Basislinie für diese Triangulation dient dabei der Durchmesser der Erdbahn. Weiter entfernte Sterne oder gar extragalaktische Objekte erfordern jedoch andere, indirekte Methoden. Dazu benötigen die Astronomen Himmelskörper, die eine einheitliche Helligkeit haben, oder deren Helligkeit in einer festen Beziehung zu einer anderen, entfernungsunabhängigen Größe der Objekte steht, wie beispielsweise zur Rotation, zur Farbe oder – bei veränderlichen Sternen – zur Periode des Lichtwechsels. Diese so genannten Standardkerzen müssen zunächst kalibriert werden. Das heißt: Die gemessene Helligkeit müssen die Wissenschaftler mit hoher Genauigkeit auf eine »absolute« Helligkeit umrechnen, welche die Standardkerze hätte, wenn sie in einer Einheitsentfernung stünde.

Die genaueste Methode zur Entfernungsbestimmung beruht auf der Beobachtung einer bestimmten Klasse von veränderlichen Sternen, den Cepheiden. Die Atmosphären dieser Sterne pulsieren in überaus regelmäßiger Weise. Die Perioden können dabei zwischen zwei und über einhundert Tagen betragen. Am Anfang des 20. Jahrhunderts stieß die amerikanische Astronomin Henrietta Leavitt auf einen Zusammenhang zwischen der mittleren Leuchtkraft eines Cepheiden und seiner Pulsationsperiode: Je heller der Stern leuchtet, desto länger ist seine Periode (siehe Kasten oben). Allein aus der Messung seiner Pulsationsperiode lässt sich also die Leuchtkraft eines Cepheiden bestimmen. Aus seiner Leuchtkraft wiederum und der von der Erde gemessenen scheinbaren Helligkeit des Sterns kann man seine Entfernung berechnen, da die Helligkeit mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt. Ein weiterer Vorteil ist, dass Cepheiden sehr hell strahlen und deshalb auch noch in fernen Galaxien auszumachen sind.

Um aber Cepheiden in anderen Galaxien mit ausreichender Genauigkeit beobachten zu können, benötigen wir ein Teleskop mit gutem Auflösungsvermögen. Denn wir müssen diese Sterne von anderen trennen können, die ebenfalls zum Licht der Galaxie beitragen. Deshalb spielt das Hubble-Weltraumteleskop eine so große Rolle: Da es außerhalb der

turbulenten Atmosphäre stationiert ist, ist sein Auflösungsvermögen zehnmal besser als das von gewöhnlichen Teleskopen auf der Erde. Das Hubble-Teleskop gibt uns also die Möglichkeit, Cepheiden in einem tausendfach größeren Volumen des Kosmos zu beobachten als zuvor (weil das Volumen mit der dritten Potenz der Entfernung anwächst). Auf diese Weise können wir noch Cepheiden messen, die sich im nächsten großen Galaxienhaufen in knapp dreißig Megaparsec Entfernung befinden (siehe Grafik rechts). Jenseits dieser Entfernung müssen wir auf andere Verfahren zurückgreifen (siehe Kasten auf Seite 50).

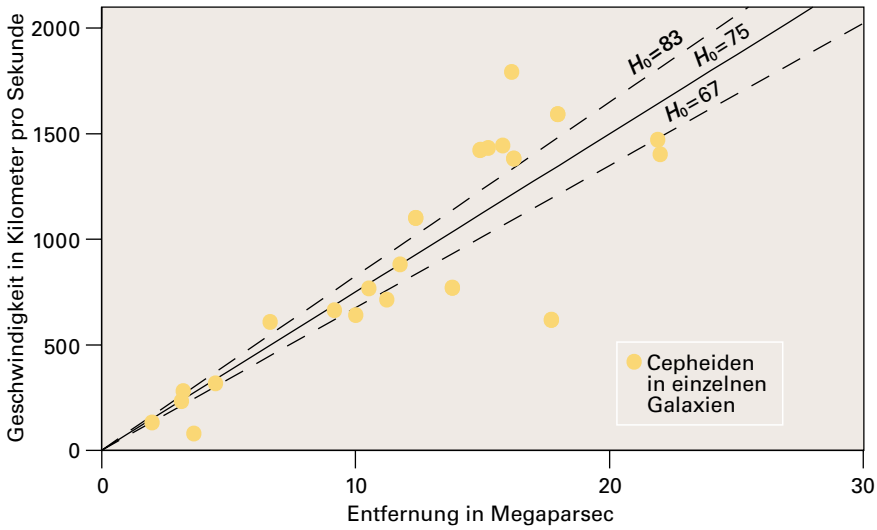
Drei dieser Methoden basieren auf bestimmten Eigenschaften von spiralförmigen und von elliptischen Galaxien. So besagt etwa die »Tully-Fisher-Relation«, dass die Rotationsgeschwindigkeit einer Spiralgalaxie mit ihrer Leuchtkraft korreliert: Lichtstarke Galaxien rotieren schneller als lichtschwache. Die Korrelation ist exzellent, wie die Beobachtung von Hunderten von Spiralgalaxien zeigt.

Für elliptische Sternsysteme gibt es eine ähnliche Beziehung: Die Sterne in den hellsten dieser Galaxien weisen einen größeren Bereich von Umlaufgeschwindigkeiten auf, haben also eine größere Geschwindigkeitsdispersion.

Supernovae als Maßstab

Ein drittes Verfahren nutzt den Umstand, dass es mit zunehmender Entfernung immer schwieriger wird, einzelne Sterne in einer Galaxie zu erkennen. Wenn zum Beispiel auf dem Bild einer nahen Galaxie in jedem Pixel – in jedem Bildelement einer digitalen Aufnahme – zehn Sterne stehen, könnten es bei einer weiter entfernten Galaxie tausend Sterne pro Pixel sein. Die nahe Galaxie würde deshalb körniger erscheinen, weil die Helligkeitsvariationen von Pixel zu Pixel größer wären als bei der ferneren. Aus der Stärke dieser Helligkeitsvariationen kann man also ebenfalls auf die Entfernung schließen. Alle diese Verfahren lassen sich bis zu einer Entfernung von etwa 150 Megaparsec nutzen.

Zu den vielversprechendsten kosmologischen Entfernungsindikatoren gehört die Spitzenhelligkeit von Supernovae des Typs Ia (siehe Foto rechts). Zu solchen Sternexplosionen kommt es, wenn in einem Doppelsternsystem Materie von einem normalen Stern auf einen Weißen Zwerg strömt. Irgendwann über- ▷

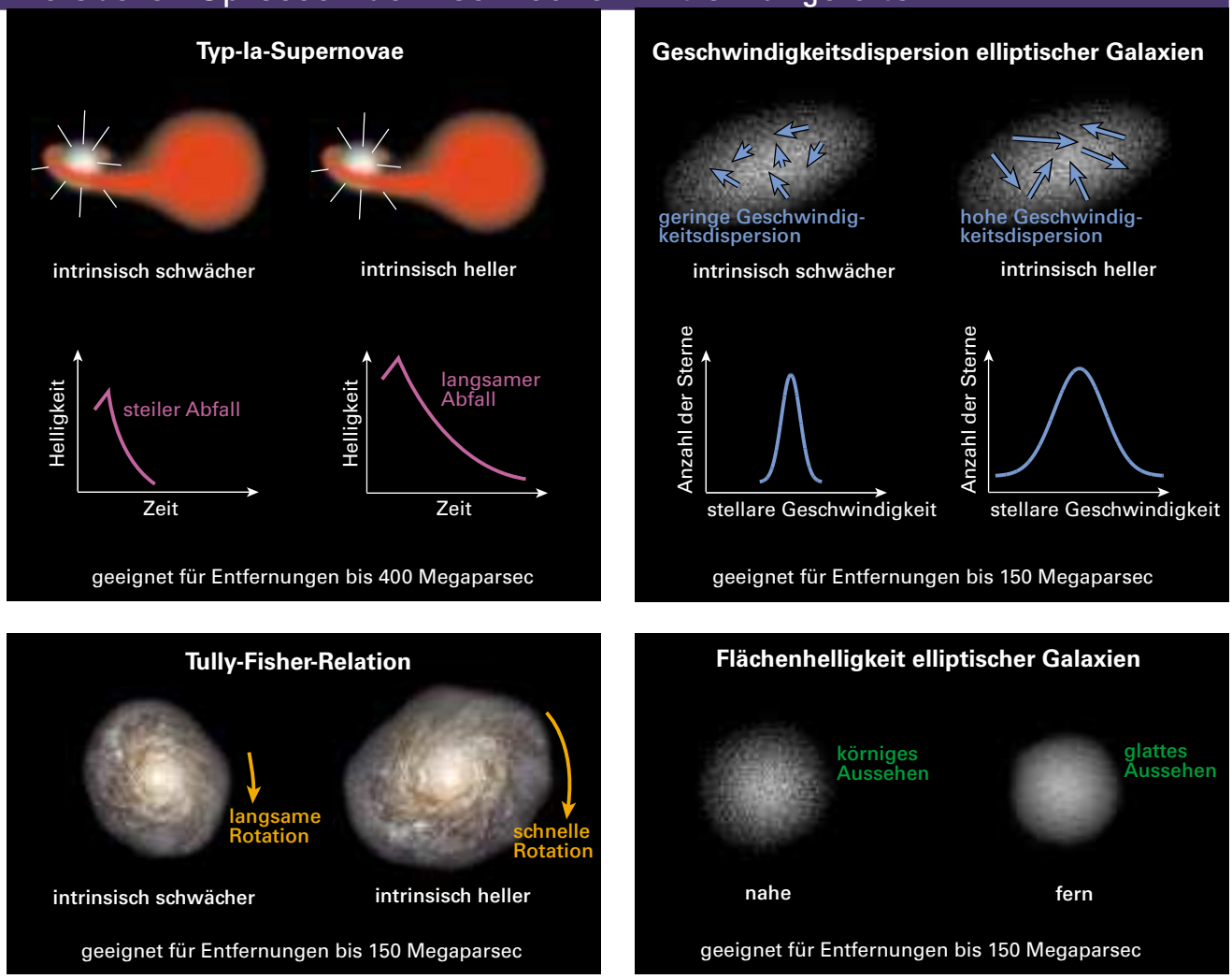


Die Geschwindigkeiten und Entfernungen von Galaxien, die mithilfe von Cepheiden bestimmt wurden, liefern für die Hubble-Konstante einen Wert von 75 Kilometer pro Sekunde pro Megaparsec (Steigung der durchgezogenen Linie). Für Entfernungen größer als etwa 25 Megaparsec haben die Astronomen weitere Methoden eingesetzt, um einen genaueren Wert für die Hubble-Konstante zu erhalten. (Die gestrichelten Linien entsprechen einem Fehler von zehn Prozent.)

Supernovae des Typs Ia, wie hier die Supernova 1994D (links unten im Bild), eignen sich ebenfalls als Entfernungsindikatoren. Bis zu Entfernungen von 400 Megaparsec werden sie zur Bestimmung der Hubble-Konstanten herangezogen. Jenseits davon jedoch ist der Zusammenhang zwischen ihrer Fluchtgeschwindigkeit und ihrer Entfernung nicht mehr linear – ein Indiz, dass sich die Expansion des Kosmos beschleunigt, was kaum ein Astronom erwartet hatte.

HIGH-Z SUPERNOVA SEARCH TEAM, HST, NASA

Die oberen Sprossen der kosmischen Entfernungsleiter

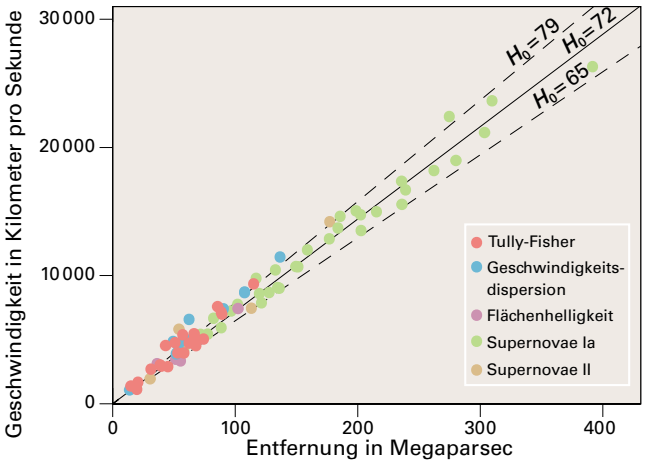


Um die Hubble-Konstante bei großen Entfernungen – bis zu 400 Megaparsec oder 1,3 Milliarden Lichtjahren – zu bestimmen, setzen die Astronomen sekundäre Entfernungsindikatoren ein. Jede dieser vier Methoden bietet einen unabhängigen Weg zur Bestimmung der relativen Entfernung einer Galaxie. Bei jeder Methode wird eine messbare Eigenschaft der Galaxie mit ihrer intrinsischen Helligkeit (beziehungsweise ihrer relativen Entfernung) korreliert. So zeigen beispielsweise die Lichtkurven intrinsisch heller Supernovae vom Typ Ia einen langsameren Abfall (oben links), die Sterne in intrinsisch helleren elliptischen Galaxien zeigen eine breitere Geschwindigkeitsverteilung (oben rechts), intrinsisch hellere Galaxien rotieren schneller (unten links), und weiter entfernte elliptische Galaxien zeigen ein glatteres Aussehen als näher gelegene (unten rechts). Die mit diesen Methoden ermittelten relativen Entfernungen werden (direkt oder indirekt) mithilfe der Cepheiden kalibriert.

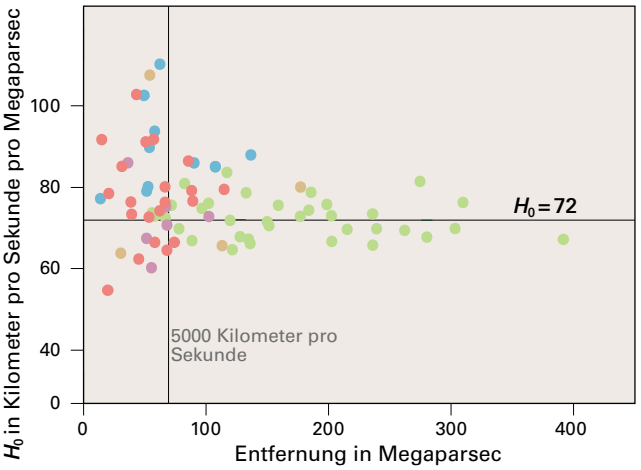
▷ schreitet die Masse des Zwergsterns seine Stabilitätsgrenze, woraufhin er kollabiert. Dieser Kollaps führt zur einer explosionsartigen Zündung der Fusion von Kohlenstoffkernen, in deren Folge der Stern sich enorm aufbläht und für kurze Zeit so hell erstrahlt wie eine ganze Galaxie.

Die Form der Lichtkurve einer solchen Supernova erzählt uns zugleich, wie groß die maximale Helligkeit des Ausbruchs war: Hellere Supernovae nämlich zeigen flacher verlaufende Lichtkurven. So lässt sich bei diesen Sternexplosionen – genau wie bei den Cepheiden – aus wahrer und scheinbarer Helligkeit wiederum leicht die Entfernung berechnen. Da Supernovae extrem hell sind, lässt sich mit ihnen die Hubble-Konstante bis zu Entfernungen von rund 400 Megaparsec bestimmen. Dort beträgt die scheinbare Fluchtgeschwindigkeit bereits 30 000 Kilometer pro Sekunde, die typischen Eigenbewegungen der Galaxien von 200 bis 300 Kilometern pro Sekunde fallen also nur noch mit weniger als einem Prozent ins Gewicht.

Auch Supernovae vom Typ II lassen sich als Entfernungsindikatoren benutzen. Hier sind es sehr massereiche Sterne unterschiedlicher Größe, die explodieren. Demzufolge zeigen diese Supernovae eine größere Bandbreite an Leuchtkräften als die Vertreter vom Typ Ia. Sie sind deshalb eigentlich keine guten Standardkerzen, doch lässt sich ihre Entfernung durch spektroskopische Untersuchungen ihrer expandierenden Hüllen und durch fotometrische Messungen ihres Winkeldurchmessers ermitteln. Diese Methode



Fünf sekundäre Geschwindigkeitsindikatoren, die mit dem Hubble-Weltraumteleskop bestimmt wurden, liefern für die Hubble-Konstante einen Wert von 72 Kilometern pro Sekunde pro Megaparsec. Aus den Friedmann-Gleichungen ergibt sich daraus für das Universum ein Alter von etwa 13 Milliarden Jahren.



Die Hubble-Konstante konvergiert auf einen Wert von 72, wenn man ferne Galaxien misst. Denn jenseits von 70 Megaparsec – entsprechend einer Fluchtgeschwindigkeit von 5000 Kilometern pro Sekunde – reduziert sich der durch die Eigenbewegung der Galaxien verursachte relative Messfehler.

funktioniert bis zu Entfernungen von 200 Megaparsec.

Die Supernova-Verfahren liefern uns zunächst lediglich relative Entfernungen der Galaxien. Um daraus absolute Entfernungen zu erhalten, benötigen wir eine Kalibrierung – und diese liefern uns wieder die Cepheiden. Diese veränderlichen Sterne stellen also sozusagen die untere Sprosse der kosmologischen Entfernungsleiter dar. Die darauf aufbauenden Methoden bezeichnen wir als sekundär. Es sei angemerkt, dass Supernovae vom Typ II im Prinzip absolute Entfernungsbestimmungen erlauben. Im Rahmen unserer Arbeit haben wir sie jedoch mit den Cepheiden kalibriert.

Mit einer einzigen Ausnahme kalibrieren die Kosmologen alle sekundären Entfernungsindikatoren über die Messung von Cepheiden in Galaxien, die eine oder mehrere jener Eigenschaften zeigen, die für die Anwendung des sekundären Verfahrens benötigt werden. Einzig die Methode der Geschwindigkeitsdispersion bei elliptischen Galaxien lässt sich nicht direkt mit den Cepheiden kalibrieren. In diesem Fall müssen zur Kalibrierung die Cepheiden-Entfernungen der Galaxienhaufen bestimmt werden, zu denen die elliptischen Galaxien gehören. Dadurch sind die Unsicherheiten bei dieser Methode größer als bei den anderen.

Alle sekundären Methoden liefern im Prinzip einen eigenen Wert für die Hubble-Konstante H_0. Doch die Streuung der einzelnen Werte ist inzwischen erstaunlich gering, was auf die Verfeinerung der Verfahren in den letzten Jahren zurückzuführen ist. Aus unseren mehrjährigen Arbeiten mit dem Weltraumteleskop finden wir $H_0 = 75$ für die Cepheiden, 71 für die Supernovae des Typs Ia, 71 für die Tully-Fisher-Relation, 82 für die Geschwindigkeitsdispersion elliptischer Galaxien, 70 für die Fluktuation der Flächenhelligkeit und 72 für Supernovae des Typs II. Das gewichtete Mittel all dieser Werte ergibt als Ergebnis $H_0 = 72 \pm 8$. Die Konvergenz auf diesen Wert ist besonders deutlich für Galaxien mit einer scheinbaren Fluchtgeschwindigkeit von mehr als 5000 Kilometern pro Sekunde (Grafik oben rechts). Dies entspricht einer Entfernung von mehr als 70 Megaparsec. Für diese Entfernungen ist die Eigenbewegung der Galaxien bereits erheblich kleiner als der Hubble-Fluss.

Hubble-Konstante und Weltalter

Was bedeutet nun der Wert 72? Erinnern wir uns: H_0 ist die gegenwärtige Expansionsrate des Kosmos. Um daraus das Alter des Universums berechnen zu können, müssen wir zusätzlich wissen, ob sich die Expansionsrate in der Vergangenheit geändert hat. Wenn die Expansion früher schneller oder langsamer verlaufen ist, muss dies natürlich bei der Berechnung des Weltalters berücksichtigt werden.

Bis vor kurzem waren sich die Kosmologen noch einig, dass die Schwerkraft der gesamten Materie im Universum die Expansionsbewegung im Laufe der Zeit bremst. Dann wäre die Expansion also früher schneller verlaufen, der Kosmos wäre dementsprechend jünger, als wenn er sich immer mit der gleichen Rate ausgedehnt hätte. Die Astronomen hatten also erwartet, auf eine höhere Expansionsrate zu stoßen, je weiter sie in die Vergangenheit des Kosmos zurückblickten.

Allerdings gab es Hinweise darauf, dass etwas mit diesem Bild nicht stimmen konnte. Rechnet man nämlich mit einer Hubble-Konstanten von 72 und nimmt an, dass die Expansionsgeschwindigkeit abnimmt, so erhält man für das Weltalter etwa neun Milliarden Jahre. Das Problem: In unserem Milchstraßensystem gibt es Sterne, die mindestens zwölf Milliarden Jahre alt sind. Da Sterne natürlich nicht älter sein können als das Universum selbst, muss also irgendetwas in diesem Bild falsch sein. Die Astronomen waren sich jedoch ziemlich sicher, das Alter der Sterne korrekt berechnet zu haben, da die Ergebnisse vieler unterschiedlicher Verfahren zur Altersbestimmung gut übereinstimmten.

Wie sich in den letzten Jahren zeigte, liegt die Lösung des Problems denn auch in einer neu entdeckten, unerwarteten Eigenschaft des Universums selbst. Zwei Gruppen von Astronomen, die ferne Supernovae beobachteten, stießen 1998 auf etwas Seltsames: Die Supernovae vom Typ Ia scheinen in großen Entfernungen ▷

schwächer zu leuchten als erwartet. Zwar wäre es denkbar, dass diese explodierenden Sterne in früheren Epochen des Kosmos tatsächlich eine geringere Leuchtkraft hatten – aber dafür gibt es keinerlei Indizien. Die einfachste Erklärung für das Phänomen ist deshalb, dass die Supernovae in Wahrheit weiter von uns entfernt sind als im Modell der abnehmenden Expansion berechnet. Die Supernovae vom Typ Ia deuten also darauf hin, dass die Expansion unseres Kosmos nicht abnimmt, sondern im Gegenteil sogar zunimmt (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/1999, S. 40). Diese Beschleunigung der Expansion konnte inzwischen durch weitere Untersuchungen bestätigt werden. Viele Astronomen sind deshalb überzeugt, dass es eine bislang unbekannte, abstoßende Kraft geben muss, die der Gravitation entgegenwirkt. Für diese Abstoßungskraft hat sich inzwischen der Begriff »Dunkle Energie« eingebürgert.

Einsteins Eselei kommt zu Ehren

Eigentlich ist diese Dunkle Energie nichts völlig Neues. Einstein hatte in seine Gleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie einen Zusatzterm eingeführt, die so genannte kosmologische Konstante Λ. Mit diesem Term wollte er den Kollaps seines Weltmodells unter dem Einfluss der Gravitation verhindern, denn er hielt das Universum für statisch. Nach der Entdeckung der kosmischen Expansion durch Hubble und andere ließ Einstein die Idee der kosmologischen Konstanten fallen – er bezeichnete sie gar als größte Eselei seines Lebens, hatte sie ihn doch daran gehindert, die Expansion des Universums vorherzusagen.

Bis vor wenigen Jahren noch haben die meisten Kosmologen ganz selbstverständlich Λ in den Friedmann-Gleichungen, welche die Entwicklung des Universums beschreiben, gleich null gesetzt. Doch die Entdeckung, dass sich die Expansion des Kosmos beschleunigt, zeigt, dass dieser Term offenbar doch nötig ist: Die kosmologische Konstante repräsentiert möglicherweise die Dunkle Energie oder, physikalischer ausgedrückt, die Energiedichte Ω_Λ des Vakuums. Diese Energiedichte hat merkwürdige Eigenschaften: Sie krümmt den Raum ganz ähnlich, wie es Materie tut, aber zugleich übt sie einen negativen Druck aus, der zu jener beschleunigten Expansion führt, die wir beobachten (Spektrum der Wissenschaft 3/1999, S. 46, und 3/2001, S. 32).

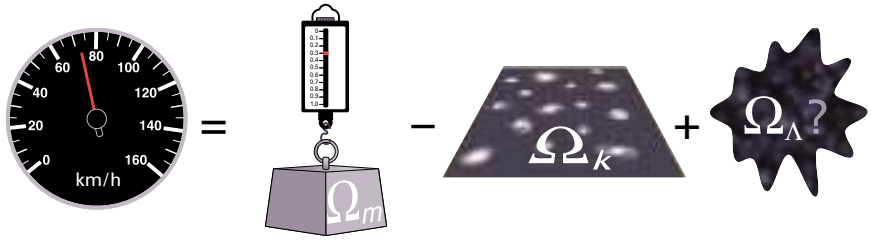
Wie können wir also nun, im Lichte dieser neuen Forschungsergebnisse, das Alter des Universums abschätzen? Wenn wir die Friedmann-Gleichungen anwenden wollen, benötigen wir nicht nur den Wert von H_0, sondern wir müssen auch die Dichteparameter Ω_m und Ω_Λ sowie den Krümmungsterm Ω_k kennen. Die Theorie der Inflation (ein sehr erfolgreiches kosmologisches Modell, das für das frühe Universum eine extrem rasante Expansion, eben die so genannte inflationäre Phase, vorhersagt) sowie die Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung weisen darauf hin, dass wir in einem flachen Universum leben, in dem $\Omega_k = 0$ ist. In einem solchen Kosmos gilt dann per Definition $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$.

Die Massendichte Ω_m müssen wir aus Beobachtungen und Experimenten bestimmen – keine einfache Angelegenheit. Die Rotationsgeschwindigkeiten der Galaxien und die Dynamik der Galaxienhaufen deuten nämlich darauf hin, dass die sichtbare Materie, also die Sterne und die Gasnebel, nur einen kleinen Teil der gesamten Masse im Universum ausmachen. Ein Großteil der Masse scheint in Form unsichtbarer »Dunkler Materie« vorzuliegen, die über die Schwerkraft mit der leuchtenden Materie in Wechselwirkung steht und so die Bewegung der Sterne und Galaxien beeinflusst.

Die sichtbaren Sterne und Gasnebel tragen offenbar gerade einmal ein Prozent zur Gesamtmasse des Kosmos bei. Weitere vier Prozent der Masse steuern möglicherweise nicht leuchtende Körper bei, also zum Beispiel planetenartige Objekte oder warmes intergalaktisches Gas. Diese normale Materie, die hauptsächlich aus Baryonen (Neutronen und Pro-

Die Friedmann-Gleichung und die kosmologischen Parameter

Albert Einstein suchte seine Rechnungen zu vereinfachen, indem er voraussetzte, dass das Universum homogen und isotrop ist, also überall die gleiche Dichte hat und in jeder Richtung gleich aussieht. Unsere heutigen Beobachtungen bestätigen dies. Aus der Allgemeinen Relativitätstheorie ergibt sich damit die Friedmann-Gleichung, welche die zeitliche Entwicklung des Universums beschreibt (siehe rechts).

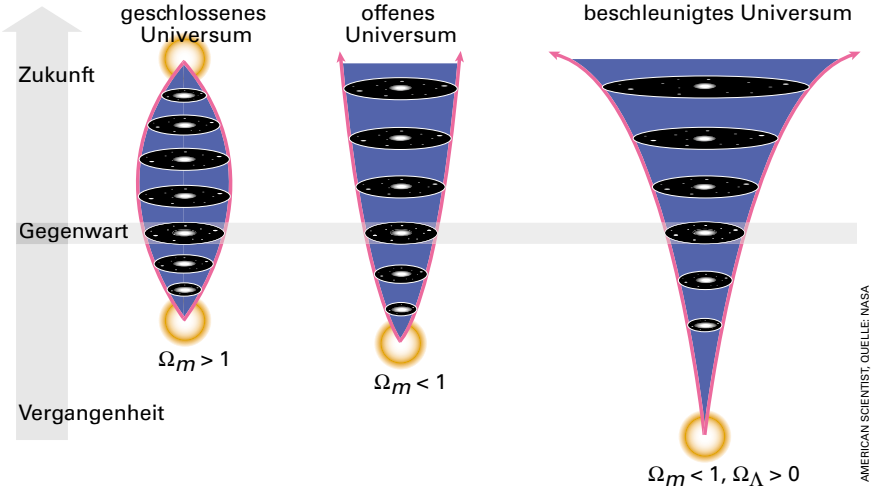


Hierbei ist H die Hubble-Konstante, G die Gravitationskonstante, ρ_m die mittlere Materiedichte, k die Raumkrümmung, r der Skalenfaktor (die relative Entfernung der Galaxien als Funktion der Zeit) und Λ die von Einstein eingeführte kosmologische Konstante. Aus dieser Gleichung können wir Alter und Größe des Universums berechnen, wenn die kosmologischen Parameter gemessen wurden.

Wenn wir beide Seiten der Gleichung durch H^2 teilen, erhalten wir die Massendichte $\Omega_m = 8\pi G\rho_m / 3H^2$, den Krümmungsterm $\Omega_k = -k / r^2 H^2$ und die Energiedichte des Vakuums $\Omega_\Lambda = \Lambda / 3H^2$. Daraus ergibt sich die Beziehung $\Omega_m + \Omega_k + \Omega_\Lambda = 1$.

Messungen der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung – beispielsweise durch die Satelliten Cobe und WMAP – deuten darauf hin, dass unser Universum flach ist, also $\Omega_k = 0$. Damit lässt sich die Entwicklung des Kosmos ausschließlich mit der Materiedichte Ω_m und der Vakuumenergiedichte Ω_Λ beschreiben. Jüngste Beobachtungen zeigen, dass unser Universum offenbar nicht von Materie, sondern von der Vakuumenergiedichte dominiert wird, die einen negativen Druck ausübt und so die Expansion beschleunigt.

Das Universum gibt Gas



Die zeitliche Entwicklung des Universums hängt von der in ihm enthaltenen Masse und Energie ab. Der Parameter Ω_m ist das Verhältnis der Materiedichte zur kritischen Dichte, die ein ewig expandierendes Modelluniversum von einem solchen trennt, dessen Expansion irgendwann endet und sich in einen Kollaps umkehrt. In einem geschlossenen Universum ($\Omega_m > 1$) führt die Anziehungskraft der Materie zum finalen Kollaps (dem Endknall oder *Big Crunch*). In einem offenen Universum ($\Omega_m < 1$) dagegen reicht diese Anziehungskraft nicht aus, die Expansion geht ewig weiter. Die Messungen der Astronomen zeigen, dass zwar $\Omega_m < 1$ ist, dass aber zusätzlich eine Vakuumenergiedichte Ω_Λ die Expansion beschleunigt. Jedes dieser unterschiedlichen Modelle liefert, ausgehend vom heutigen Wert der Hubble-Konstanten, ein anderes Alter für das Universum.

▷ tonen) aufgebaut ist, liefert demnach insgesamt nur fünf Prozent der kritischen Dichte für ein flaches Universum. Weitere 25 Prozent liegen anscheinend in Form exotischer (nicht-baryonischer) Materie vor. Das könnten bislang unbekannte exotische Elementarteilchen sein, die mit der baryonischen Materie ausschließlich über die Schwerkraft in Wechselwirkung stehen. Damit sind wir bei dreißig Prozent der kritischen Dichte (oder Ω_m = 0,3). Die Vakuumenergiedichte muss also etwa siebzig Prozent zur Gesamtdichte von Materie und Energie in einem flachen Universum beitragen (Ω_Λ = 0,7).

Die Revolution in der Kosmologie geht weiter

Wenn wir diese Werte in die Friedmann-Gleichungen einsetzen sowie den Wert 72 für die Hubble-Konstante, dann erhalten wir ein Weltalter von 13 ± 1 Milliarden Jahren. Dieser Befund, den wir aus unseren Messungen mit dem Hubble-Weltraumteleskop abgeleitet haben, steht nicht mehr im Widerspruch zum Alter der ältesten Sterne.

Unabhängige Messungen mit dem Satelliten WMAP *(Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)* haben im Februar 2003 diese Werte bestätigt und sogar noch kleinere Fehlergrenzen geliefert (Spektrum der Wissenschaft 5/2003, S. 8). WMAP führte die bislang genauesten Untersuchungen der Temperaturschwankungen in der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung durch. Aus diesen Messungen ergab sich eine Hubble-Konstante H_0 von 71, eine mittlere Materiedichte Ω_m von 0,27 und eine Vakuumenergiedichte Ω_Λ von 0,73. Daraus folgt mit einem Fehler von einem Prozent ein Weltalter von 13,7 Milliarden Jahren.

Noch vor wenigen Jahrzehnten sah unser Universum für die Kosmologen erheblich einfacher aus: Es gab nur die gewöhnliche Materie, und die Expansion ließ sich mit der Hubble-Konstanten und der Materiedichte allein beschreiben. Heute haben wir überzeugende Belege dafür, dass etwa ein Viertel der Gesamtdichte des Kosmos in Form nicht-baryonischer Materie vorliegt. Zudem zeigen die jüngsten Beobachtungen, dass der überwiegende Rest von einer mysteriösen Dunklen Energie beigetragen wird. Bislang liefert uns die Theorie keinerlei Erklärung dafür. Im Gegenteil: Berechnungen, die auf den Theorien der modernen Teilchenphysik basieren, stehen in krassem Gegensatz zu den astronomischen Beobachtungen (und das war schon so, als wir noch dachten, die kosmologische Konstante sei null). Die Astronomie liefert uns also einen Hinweis auf eine neue Physik – und auf einen Kosmos, der zu 95 Prozent aus exotischen Masse- und Energieformen besteht.

Wir befinden uns also in einer aufregenden Phase der Kosmologie. Die Zeiten, in denen der Astronom einsam in seiner Teleskopkabine saß, sind zwar vorbei. Aber eine Reihe von sorgfältig geplanten Beobachtungen läutet eine neue Ära der Präzision in der Kosmologie ein. Viele Experimente suchen derzeit nach den schwach wechselwirkenden Teilchen, aus denen die Dunkle Materie bestehen könnte. Große Forschergruppen messen sorgfältig die Beschleunigung der kosmischen Expansion.

Es gibt sogar Pläne für einen Satelliten, der ausschließlich dieser Aufgabe gewidmet sein soll. Bis zum Ende des Jahrzehnts können neue Satelliteninterferometer – die Space Interferometry Mission (SIM) der Nasa und das Projekt Gaia der Esa – uns erheblich genauere Werte für die Hubble-Konstante liefern. Die geradezu explosionsartige Entwicklung unserer technischen Möglichkeiten liefert uns eine Vielzahl unabhängiger Messungen dieser Parameter. Noch mag uns das komplette Bild fehlen, aber zweifellos sind wir inmitten einer Revolution, die unser Bild vom Universum nachhaltig verändern wird. ◁

Wendy Freedman ist Astronomin an den Carnegie-Observatorien in Pasadena (Kalifornien). Sie promovierte 1984 an der Universität Toronto (Kanada) und gehörte einer Projektgruppe an, die mithilfe des Hubble-Weltraumteleskops die extragalaktische Entfernungsskala bestimmte. Ihre weiteren Forschungsinteressen gelten der Entwicklung von Galaxien und Sternpopulationen.

© American Scientist Magazine (siehe www.americanscientist.org)

Das Universum in der Nussschale. Von Stephen W. Hawking, Gregory Benford, Markus Pössel. Hoffmann & Campe, 2002.

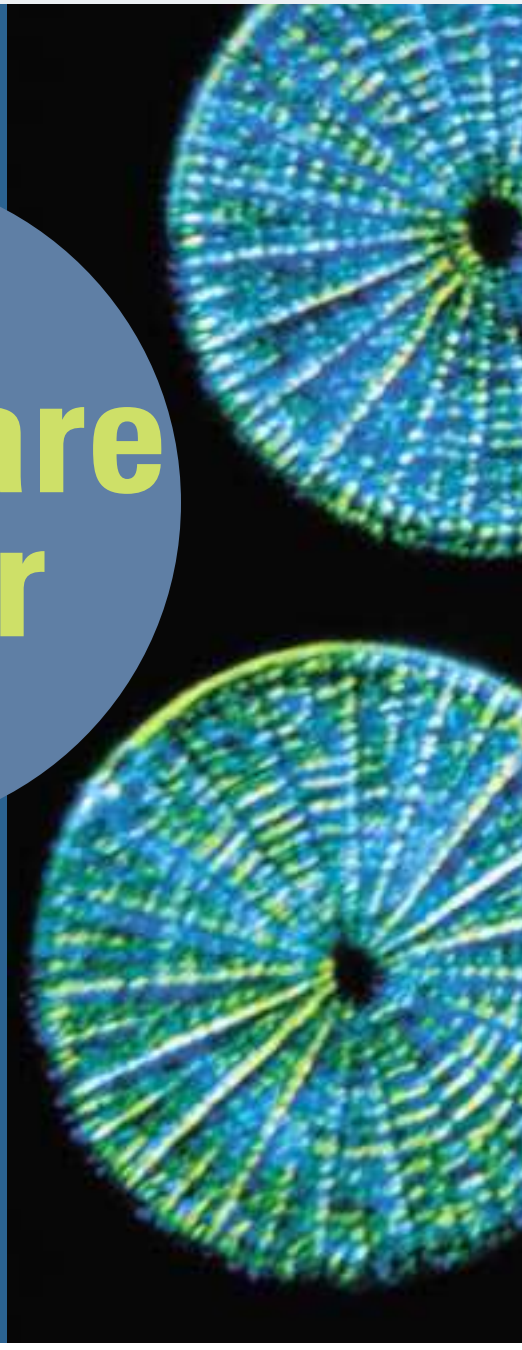
Schöpfung ohne Ende. Die Geburt des Kosmos. Sterne und Weltraum Special 2, Neuauflage 2002.

The Expansion Rate of the Universe. Von W. L. Freedman in: Astronomy and Geophysics, Bd. 43, S. 10 (2002).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE

Der unsichtbare Wald im Meer



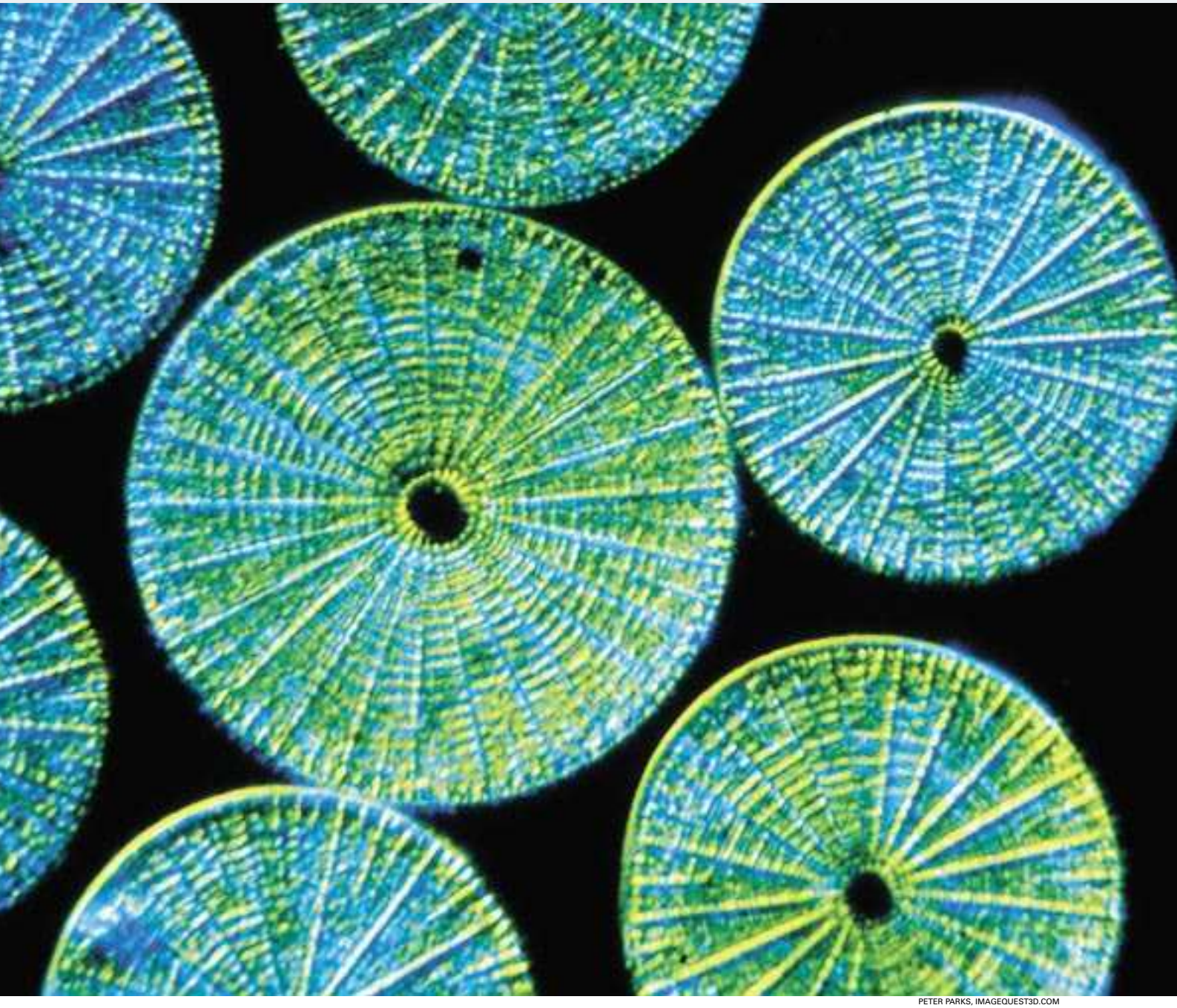
Das Phytoplankton entzieht der Atmosphäre große Mengen Kohlendioxid. Durch Düngung der Meere mit Eisen lässt sich die Vermehrung dieser Mikroorganismen anregen; damit wäre möglicherweise der globalen Erwärmung entgegenzuwirken.

Von Paul G. Falkowski

Ein einziger Wassertropfen aus den oberen Schichten des Meeres enthält Tausende mikroskopisch kleiner pflanzlicher Lebewesen: das Phytoplankton. Zu diesen einzelligen Organismen zählen die Kieselalgen, deren Silikat-Skelette in ihrer großen Vielfalt an geometrischen Formen seit jeher jeden Wissenschaftler begeistern, der durchs Mikroskop schaut. Das Phytoplankton bewohnt alle Ozeane und damit drei Viertel der Erdoberfläche, aber es enthält nicht einmal ein Prozent der 600 Milliarden Tonnen Kohlenstoff, die in der pflanzlichen Biomasse der Erde gebunden sind. Wegen der Winzigkeit der einzelnen Zellen ist dieser Unterwasserwald nahezu unsichtbar; gleichwohl beeinflusst er entscheidend die wichtigsten Stoffkreisläufe der Erde.

Das ist unumstritten; allerdings wissen wir erst seit kurzem einigermaßen genau, wie viel Kohlendioxid die winzigen Meeresbewohner aus der Atmosphäre in die Tiefsee verfrachten. Darüber hinaus machen neue Satellitenbeobachtungen und groß angelegte ozeanografische Forschungsprojekte allmählich deutlich, wie empfindlich die Mikroorganismen auf Veränderungen der globalen Temperatur, der Meeresströmungen und des Nährstoffangebots reagieren.

Diese Erkenntnisse haben bei einigen Wissenschaftlern, Unternehmern und politischen Entscheidungsträgern die Hoffnung geweckt, man könne durch Einbringen von Nährstoffen in die Meere die Menge an Phytoplankton vermehren und so der globalen Erwärmung entgegenwirken. Anfang letzten Jahres hat ein zweimonatiges Experiment im Südpolarmeer belegt, dass die Anreicherung der Oberflächenschicht mit kleinen Mengen von Eisen tatsächlich das Wachstum des Phytoplanktons anregt; dennoch bleibt es heftig umstritten, ob



PETER PARKS, IMAGEQUEST3D.COM

Die größten Vertreter der Phytoplanktonwelt sind die Kieselalgen. Die hier abgebildeten Zellen der Gattung *Arachnoidiscus* erreichen einen Durchmesser von einem Millimeter.

es sinnvoll und verantwortbar ist, den Ozean in großem Maßstab zu düngen. Vor einer so folgenschweren Aktion wäre es unerlässlich, zumindest die langfristigen ökologischen Nebenwirkungen genauer abzuklären.

Der globale Blick aufs Grüne

Seit vor etwa drei Milliarden Jahren die Cyanobakterien – die weltweit häufigste Art des Phytoplanktons – erstmalig Photosynthese betrieben, ist diese der bedeutendste unter den Prozessen, die der Atmosphäre Kohlendioxid entziehen. Das Phytoplankton und seine evolutionären Nachfolger, die vor etwa 500 Millionen Jahren entstandenen Landpflanzen, spalten mithilfe der Energie aus dem Sonnenlicht Wassermoleküle in Wasserstoff- und Sauerstoffatome. Der Sauerstoff wird als Abfallprodukt ausgeschieden und liefert allen Tieren, einschließlich uns selbst, die Luft zum Atmen. Den Wasserstoff wandeln die Photosynthese treibenden Organismen mit Kohlenstoff aus anorganischem CO_2 in organische Substanzen, insbesondere Zucker, um und bauen daraus ihre Zellen auf. Dieser Prozess prägt den Kohlenstoffzyklus der Erde und damit auch ihr Klima.

Die Verwandlung von CO_2 in Biomasse, die so genannte Primärproduktion, konnte lange Zeit nur mangelhaft quantifiziert werden. Wie wir inzwischen wissen, haben bis vor etwa fünf Jahren die meisten Biologen den Beitrag des Phytoplanktons im Vergleich zu dem der Landpflanzen massiv unterschätzt. Zwar haben Ozeanografen in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts die Produktivität des Phytoplanktons in Tausenden von ▷

▷ Einzelmessungen erfasst, aber so unsystematisch und so ungleichmäßig über die Welt verteilt, dass nie ein auch nur halbwegs vollständiges Bild für einen bestimmten Monat oder ein bestimmtes Jahr zustande kam. Auch wenn man die Lücken mithilfe mathematischer Modelle zu füllen versuchte, blieben die Schätzungen für die globale Gesamtproduktivität unzuverlässig.

Das änderte sich 1997, als die Nasa den Sea Wide Field Sensor (SeaWiFS) in eine Erdumlaufbahn schoss, den ersten Satelliten, der imstande war, das Phytoplankton weltweit Woche für Woche zu beobachten. Dass Satelliten diese Organismen sehen können, verdanken sie dem an der Photosynthese beteiligten Chlorophyll *a* und weiteren Pigmenten, welche die blauen und grünen Anteile des Sonnenlichts absorbieren, während Wasser sie streut. Je mehr Phytoplankton an einer Stelle vorhanden ist, desto mehr Sonnenlicht dieser Wellenlänge schluckt es, sodass der Fleck dunkler erscheint als das benachbarte Wasser. Durch eine einfache Messung des vom Meer reflektierten Anteils an blauem und grünem Licht bestimmt also der Satellit die Chlorophyll- und damit auch die Phytoplanktonmenge.

Im Verbund mit den tausenden Messungen an der Oberfläche haben diese Chlorophyll-Satellitenbilder die Schätzungen erheblich verbessert. Trotz unterschiedlicher Analysemethoden kamen 1998 verschiedene Forschergruppen zur selben, verblüffenden Schlussfolgerung: Das Phytoplankton baut jedes Jahr ungefähr 45 bis 50 Milliarden Tonnen anorganischen Kohlenstoff in seine Zellen ein – fast doppelt so viel wie das Maximum dessen, was zuvor je geschätzt worden war.

Im selben Jahr beschlossen meine Kollegen Christopher B. Field und James T. Randerson von der Carnegie Institution in Washington, Michael J. Behrenfeld von der Rutgers-Universität und ich selbst, dieses globale Bild durch den Vergleich mit der Primärproduktion an Land abzurunden. Frühere Untersuchungen hatten zu der Schätzung geführt, dass die Landpflanzen pro Jahr beeindruckende 100 Milliarden Tonnen anorganischen Kohlenstoff assimilieren. Zur Überraschung vieler Ökologen enthüllte unsere Analyse der Satellitendaten, dass es tatsächlich nur etwa 52 Milliarden Tonnen sind. Anders ausgedrückt: Das Phytoplankton entzieht der Atmosphäre durch Photosynthese fast ebenso viel CO_2 wie alle Bäume, Gräser und sonstigen Landpflanzen zusammen.

IN KÜRZE

- **Phytoplankton** besteht aus einzelligen Meeresorganismen, die Sauerstoff freisetzende Photosynthese betreiben. Wegen ihres kurzen Lebenszyklus von etwa sechs Tagen reagieren sie sehr schnell auf Umweltveränderungen.
- Im Endeffekt entzieht Phytoplankton der Atmosphäre **Kohlendioxid** (CO_2) und deponiert es in der Tiefsee, bis die Strömung das Treibhausgas Jahrhunderte später an die Oberfläche zurückschafft.
- Würde das **gesamte Phytoplankton der Welt** auf einmal absterben, stiege innerhalb weniger Jahrhunderte der CO_2-Gehalt der Atmosphäre um 35 Prozent.
- Die Anreicherung der Meeresoberfläche mit **Eisen** kann das Wachstum des Phytoplanktons und damit die CO_2-Aufnahme erheblich verstärken, aber ob dadurch wirklich CO_2 in die Tiefsee verlagert wird, ist noch nicht bewiesen.
- Die **künstliche Düngung** des Meeres würde die marinen Ökosysteme zwangsläufig auf unvorhersagbare Weise beeinflussen.

Diese Erkenntnis zwang die Biologen, einen neuen Blick auf das Schicksal toter Phytoplanktonzellen zu werfen. Die Einzeller aus dem Meer treiben keinen großen Aufwand für ihre Vermehrung; eine Zellteilung genügt, und die findet im Durchschnitt alle sechs Tage statt. In diesem Zeitraum würde sich also die Masse an Phytoplankton verdoppeln, wenn nicht die Hälfte absterben oder vom Zooplankton vertilgt würde, winzigen Tierchen, die ihrerseits Krebsen, Fischen und größeren Fleischfressern als Nahrung dienen. Dagegen müssen Landpflanzen einen großen Teil der Energie in den Aufbau von Holz, Blättern und Wurzeln stecken und brauchen daher im Schnitt zwanzig Jahre, bis sie komplett durch ihre Nachfolger ersetzt sind.

Zwischenlager Tiefsee

Die Einsicht, dass der kurze Lebenszyklus des Phytoplanktons der Schlüssel zu seiner Eigenschaft als Klimaregulator ist, mündete in ein internationales Forschungsprogramm namens Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS), das seit 1988 bis heute läuft. Erstes Ziel des Programms war die Quantifizierung des ozeanischen Kohlenstoffkreislaufs. Tote Planktonzellen, Tierkot und anderes organisches Material sinken ab, werden von Mikroben aufgenommen und in anorganische Stoffe, darunter CO_2, zurückverwandelt. Ein Großteil dieses Recyclings spielt sich im lichtdurchfluteten Oberflächenwasser ab, wo das CO_2 sofort wieder für die Photosynthese verfügbar ist oder in die Atmosphäre übertritt. Zwischen den Ozeanen und der Atmosphäre wird im Verlauf von sechs Jahren so viel Gas ausgetauscht, wie in der gesamten Atmosphäre enthalten ist.

Die größte Bedeutung für das Klima haben die organischen Stoffe, die unzersetzt in die Tiefsee absinken. CO_2, das unterhalb von 200 Meter Wassertiefe freigesetzt wird, bleibt dort gefangen, weil dieses Wasser sich wegen seiner niedrigen Temperatur und hohen Dichte kaum mit der darüber liegenden, wärmeren Schicht vermischt. Durch diesen Vorgang, der als biologische Pumpe bezeichnet wird, entzieht Phytoplankton der Oberflächenschicht und der Atmosphäre CO_2 und lagert es in der Tiefsee ein (zu den Einzelheiten siehe Spektrum der Wissenschaft 10/1993, S. 24). Aus einem Bericht, den Edward A. Laws von der Universität von Hawaii, drei weitere JGOFS-Forscher und ich 2001 veröffentlicht haben, geht hervor, dass die biologische Pumpe jährlich zwischen 7 und 8 Milliarden Tonnen, also etwa 15 Prozent des vom Phytoplankton assimilierten Kohlenstoffs, in die Tiefsee verfrachtet.

Im Laufe einiger hundert Jahre gelangen fast alle Stoffe, die in die Tiefsee absinken, durch aufwärts gerichtete Strömungen wieder ins Oberflächenwasser zurück, wo sie das Wachstum des Phytoplanktons fördern. Zusammen mit der biologischen Pumpe ergibt sich ein Kreislauf. Wenn dieser in seinem natürlichen Gleichgewicht ist, liegt der CO_2-Gehalt der Atmosphäre etwa 200 ppm (parts per million oder tausendstel Promille) niedriger, als wenn es die biologische Pumpe nicht gäbe: angesichts des heutigen atmosphärischen CO_2-Gehalts von 365 ppm ein ganz erheblicher Beitrag.

MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON THE SEAWIFS PROJECT, NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER UND ORBIMAGE

Unmittelbar südlich von Neufundland erstreckt sich eine Coccolithophoren-Blüte über einige hundert Quadratkilometer des ansonsten tiefblauen Atlantiks. Solche natürlichen Phytoplanktonblüten entstehen im späten Frühjahr, wenn die Strömung Nährstoffe aus der Tiefsee in die lichtdurchflutete Oberflächenschicht trägt.

Die biologische Pumpe hat allerdings ein kleines Leck: Etwa ein halbes Prozent der toten Phytoplanktonzellen und des Tierkots lagert sich am Meeresgrund ab, statt an die Oberfläche zurückzukehren. Ein Teil dieses Kohlenstoffs wird zu Sedimentgestein – Schwarzschiefer zum Beispiel, dem weltgrößten Reservoir organischer Stoffe. Ein noch kleinerer Teil bildet sich zu Erdöl und -gas um. Die wichtigsten Brennstoffe der industrialisierten Welt sind also nichts anderes als fossile Überreste von Phytoplankton.

Der Kohlenstoff in Schiefer und anderem Gestein kehrt erst in die Atmosphäre zurück, nachdem die tektonischen Platten, in die er eingebaut ist, bei ihrer Kollision an Subduktionszonen tief ins Erdinnere gedrückt und dort durch die extreme Hitze und den Druck aufgeschmolzen werden. Das dabei freigesetzte CO_2-Gas entweicht schließlich bei Vulkanausbrüchen.

Die Verfeuerung fossiler Brennstoffe bringt diesen Kohlenstoff etwa eine Million Mal so schnell in den Kreislauf zurück wie der Vulkanismus. Die Wälder und das Phytoplankton können das CO_2 nicht schnell genug aufnehmen, um den zusätzlichen Eintrag auszugleichen, und die Konzentration dieses Klimagases ist erheblich angestiegen. Dass dieser Anstieg eine der Hauptursachen für die globale Erwärmung der letzten fünfzig Jahre ist, gilt als nahezu sicher.

Als die politischen Entscheidungsträger in den 1990er Jahren nach Wegen suchten, das überschüssige Gas loszuwerden, setzten sie ihre Hoffnung auf die Weltmeere, die im Prinzip das gesamte CO_2 aus der Öl-, Gas- und Kohleverbrennung binden könnten. Einige Forscher und Firmen schlugen vor, zu diesem Zweck die biologische Pumpe künstlich zu beschleunigen. Das ließe sich grundsätzlich auf zwei Wegen erreichen: indem man zusätzliche Nährstoffe in die oberflächlichen Meeresschichten einleitet oder indem man das Phytoplankton dazu bringt, die vorhandenen Nährstoffe besser zu nutzen. (Hier und im Folgenden wird unter »Nährstoff« alles verstanden, was der Organismus zum Leben braucht.) In beiden Fällen würde die Vermehrung der mikroskopisch kleinen Organismen angeregt, und mehr tote Zellen würden entsprechend mehr Kohlenstoff in die Tiefsee abführen.

Der begrenzende Faktor

Erst seit einigen wichtigen Entdeckungen der letzten Jahre kennen wir die natürliche Verteilung der Nährstoffe in den Meeren. Alle Arten von Phytoplankton brauchen Stickstoff und Phosphor. Lange hatte man den Phosphor für den knapperen Nährstoff gehalten. Dieses zur Synthese von Nukleinsäuren nötige Element kommt nur in phosphathaltigen Gesteinen des Festlands vor und wird durch Süßwasser, vor allem Flüsse, ins Meer gespült. Stickstoff (N_2) hingegen ist das häufigste Gas der Atmosphäre und löst sich gut im Meerwasser.

Zu Beginn der 1980er Jahre erkannten die Meeresbiologen jedoch, dass sie die Fähigkeit der Lebewesen zur Stickstoffaufnahme überschätzt hatten. Die wenigsten Phytoplanktonarten können molekularen Stickstoff (N_2) in ihre Proteine einbauen; alle anderen brauchen fixierten, also mit Wasserstoff- oder Sauerstoffatomen verbundenen Stickstoff in Form von Ammonium (NH_4^+), Nitrit (NO_2^-) oder Nitrat (NO_3^-). Den Löwenanteil dieser Fixierung leisten einige wenige Bakterien- und Cyanobakterienarten. Sie wandeln N_2 in Ammonium um, das dann bei ihrer Zersetzung ins Meerwasser gelangt.

Aus den Einzelheiten dieser chemischen Umwandlung geht hervor, warum tatsächlich der Stickstoff der wachstumsbegrenzende Faktor ist. Die Reaktion wird nämlich sowohl in den Bakterien als auch den Cyanobakterien durch das Enzym Nitrogenase katalysiert; das wiederum ist für den entscheidenden Reaktionsschritt auf Eisen angewiesen. In Cyanobakterien wird die Energie zur Fixierung des Stickstoffs vorrangig von Adenosintriphosphat (ATP) zur Verfügung gestellt, dessen Herstellung ebenfalls relativ viel Eisen erfordert. Daher glauben viele Ozeanografen heute, dass dieses Metall der begrenzende Faktor für die gesamte Stoffwechselkette ist.

In vielen Meeresregionen ist Eisen so knapp, dass die Produktivität des Phytoplanktons erheblich darunter leidet. Der 1993 verstorbene John Martin, Chemiker an den Meereslaboratorien in Moss Landing (Kalifornien), vermutete dies Mitte der 1980er Jahre und konnte es durch Präzisionsmessungen auch nachweisen: Im äquatorialen und nordöstlichen Pazifik sowie im Südpolarmeer ist ▷

▷ die Eisenkonzentration so niedrig, dass Phosphor und Stickstoff in der Oberflächenschicht nie ganz verbraucht werden.

Martins Hypothese war anfangs umstritten, vor allem weil ältere Messungen einen viel höheren Eisengehalt im Meerwasser ergeben hatten. Diese Proben erwiesen sich später als verunreinigt. Martin und seine Kollegen machten darauf aufmerksam, dass Eisen abseits der Küsten praktisch nur als Bestandteil des Staubs mit dem Wind in die Meere geblasen wird. Daher liegt seine Konzentration im offenen Meer selten über 0,2 ppm – ein Fünfzigstel bis Hundertstel der Konzentrationen von Phosphat und fixiertem, anorganischem Stickstoff.

Material aus der Vergangenheit, festgehalten in den Eisschichten der Antarktis, spricht ebenfalls für Martins Hypothese. Der Wostok-Eisbohrkern, gewissermaßen eine Chronik der letzten 420 000 Jahre Erdgeschichte, zeigt, dass während der Eiszeiten der Eisengehalt und die Durchschnittsgröße der Staubpartikel höher lagen als zu anderen Zeiten (Spektrum der Wissenschaft 11/2001, S. 30). Das deutet darauf hin, dass die Kontinente trockener und die Windgeschwindigkeiten höher waren, wodurch mehr Eisen und Staub in die Atmosphäre gelangten als in den feuchteren Zwischeneiszeiten.

Das knappe Eisen im Meer …

Wie Martin und andere Forscher außerdem feststellten, ging ein hoher Staubanteil stets mit einem niedrigen CO_2-Gehalt einher und umgekehrt. Dieser Zusammenhang lässt vermuten, dass der höhere Eiseneintrag in die Meere während der kältesten Perioden sowohl die Fixierung von Stickstoff als auch die Nutzung der Nährstoffe durch das Phytoplankton förderte. Das wiederum dürfte die biologische Pumpe auf Hochtouren gebracht und damit mehr CO_2 aus der Atmosphäre abgeführt haben.

Im Verlaufe einiger Jahrtausende hatte das Phytoplankton geradezu dramatisch auf die damaligen Klimaänderungen reagiert. Martin wollte nun wissen, ob sich auch kleine Veränderungen bemerkbar machen – und zwar bereits nach einigen Tagen. Im Jahre 1993 führten seine Kollegen im äquatorialen Pazifik das weltweit erste Experiment zur Eisendüngung im offenen Meer durch. Aus den Tanks ihres Forschungsschiffes ließen sie ein paar hundert Kilogramm Eisen in Form verdünnter Eisensulfatlösung ins Wasser laufen, während das Schiff wie ein Rasenmäher auf einem fünfzig Quadratkilometer großen Fleck hin- und herfuhr. Das Ergebnis war viel versprechend, aber nicht schlüssig, vor allem da die Wissenschaftler nur etwa eine Woche Zeit hatten, die Reaktion des Phytoplanktons zu erfassen. Als dasselbe Team 1995 ein vierwöchiges Nachfolgeexperiment durchführte, gaben die Daten ein deutliches Bild: Der Eiseneintrag hatte die Photosyntheseleistung des Phytoplanktons drastisch erhöht und zu einer Blüte geführt, die das Wasser grün färbte (Spektrum der Wissenschaft 6/1997, S. 24).

Seither haben drei Gruppen aus Neuseeland, Deutschland und den USA unabhängig voneinander zweifelsfrei gezeigt, dass sich die Produktivität des Phytoplanktons im Südpolarmeer durch Ausbringen kleiner Eisenmengen erheblich steigern lässt. Das deutsche Experiment »Eisenex« wurde von Oktober bis Dezember 2000 mit dem Forschungsschiff »Polarstern« durchgeführt. Die bislang größte Meeresdüngung war das Southern Ocean Iron Experiment (SOFeX, nach der chemischen Bezeichnung Fe für das Element Eisen) unter der Leitung des Forschungsinstituts des Monterey-Bay-Aquariums und der Meereslaboratorien in Moss Landing. Drei Schiffe und 76 Wissenschaftler, darunter vier meiner Kollegen von der Rutgers-Universität, waren im Januar und Februar 2002 unterwegs. Das vorläufige Ergebnis: Eine Tonne Eisensulfat, über etwa 300 Quadratkilometer verteilt, hat innerhalb von acht Wochen zu einer Verzehnfachung der Primärproduktion geführt.

Diese Versuche haben die meisten Biologen davon überzeugt, dass Eisendüngung in den höheren Breitengraden tatsächlich das Wachstum des Phytoplanktons anregt; aber ob dieser Zuwachs wirklich die Leistung der biologischen Pumpe und die Einlagerung von CO_2 in die Tiefsee erhöht, ist noch nicht bewiesen. Nach den jüngsten Modellrechnungen könnte das Phytoplankton, selbst wenn es in den nächsten hundert Jahren den gesamten Stickstoff- und Phosphorvorrat der Oberflächenschicht des Südpolarmeers verbrauchen würde, höchstens 15 Prozent des durch die Nutzung fossiler Brennstoffe freigesetzten CO_2 vorübergehend aus dem Verkehr ziehen.

In der Rechnung stecken noch sehr große Unsicherheiten. Gleichwohl wollen einige öffentliche wie privatwirtschaftliche Organisationen die künstliche Meeresdüngung in großem Stil angehen. So hat eine Firma ein Geschäftsmodell vorgeschlagen, nach dem Handelsschiffe auf ihrer Route durch den südlichen Pazifik ständig kleine Mengen einer Düngemischung ausbringen. Andere Gruppen denken daran, Nährstoffe – darunter Eisen und Ammonium – durch Pipelines in die küstennahen Gewässer einzuleiten. Drei amerikanische Unternehmer haben es sogar geschafft, von der US-Patentbehörde sieben Patente für kommerzielle Meeresdüngungstechniken zu erhalten; über einen weiteren Antrag ist noch nicht entschieden.

… durch Düngung nachliefern?

Bislang ist jedoch unklar, ob solche Vorhaben überhaupt realisierbar sind. Um wirksam zu sein, müsste die Düngung jahrzehntelang betrieben werden. Da die Meeresströmung letztendlich den gesamten Wasserkörper umwälzt, würde jegliches CO_2, das die biologische Pumpe zusätzlich in der Tiefsee einlagert, wenige Jahrhunderte nach der letzten Düngung wieder in die Atmosphäre gelangen.

Noch schwerer wiegen die Bedenken bezüglich der Kontrollierbarkeit solcher Projekte. Schon ein Bauer kann kaum verhindern, dass Dünger von seinem Feld in die Umwelt übertritt; und eine Eisenlösung innerhalb einer Parzelle im turbulenten Meer zu halten ist schlicht unmöglich. Viele Experten befürchten, dass eine groß angelegte Meeresdüngung Langzeitschäden verursachen würde, die dann kaum wieder gutzumachen wären.

In erster Linie wäre die marine Nahrungskette betroffen: Computersimulationen und Beobachtungen natürlicher Phytoplanktonblüten lassen befürchten, dass im Gefolge einer Blüte ein schwerer örtlicher Sauerstoffmangel droht. Denn die Mikroben, die von den absinkenden toten Phytoplanktonzellen leben, verbrauchen den Sauerstoff manchmal schneller, als die Meeresströmung ihn nachliefert. Lebewesen, die nicht schnell genug in sauerstoffreicheres Wasser fliehen können, würden dann ersticken.

Diese Umweltbedingungen fördern außerdem das Wachstum von Mikroben, die Methan und Distickstoffoxid (N_2O) produzieren, zwei weitere Treibhausgase, die Wärmestrahlung noch stärker absorbieren als CO_2. Nach Angaben des amerikanischen Meeres- und Wetterdienstes ▷

Der Kohlenstoffkreislauf der Erde

Die Temperatur an der Erdoberfläche wird auf lange Frist entscheidend durch den Gehalt der Atmosphäre an dem Treibhausgas Kohlendioxid beeinflusst. Dieser ist an den CO_2-Gehalt der oberen Meeresschichten gekoppelt: Der Austausch ist so intensiv, dass theoretisch in sechs Jahren das gesamte atmosphärische Kohlendioxid ausgewechselt wäre.

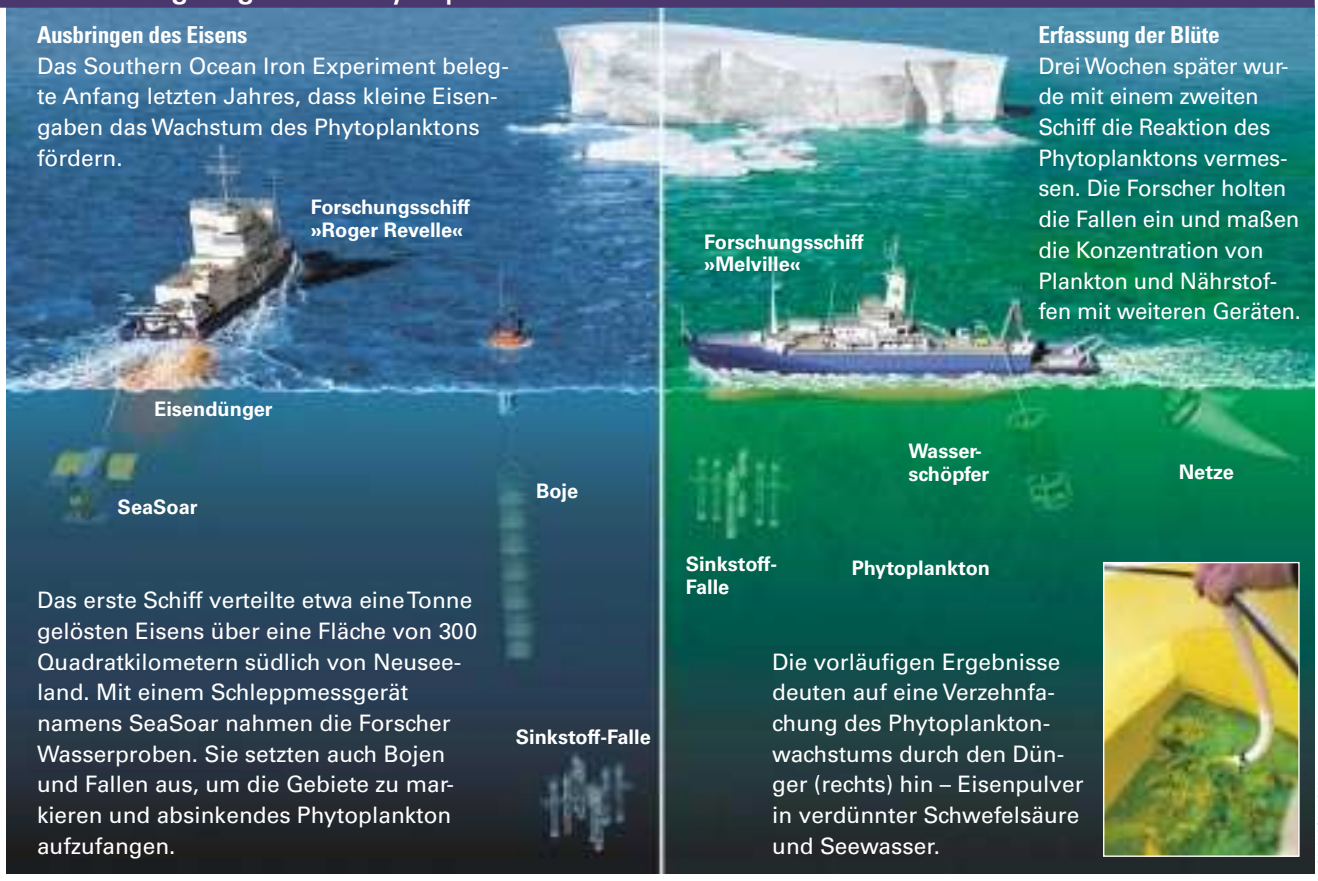
Im Kohlenstoffkreislauf spielen chlorophyllhaltige Einzeller, Phytoplankton genannt, eine vierfache Schlüsselrolle: Die mikroskopisch kleinen Meeresbewohner bauen per Photosynthese jährlich etwa 50 Milliarden Tonnen Kohlenstoff in ihre Zellen ein. Eisenhaltiger Staub, den der Wind ins Meer trägt, wirkt wie Dünger (1). Etwa 15 Prozent des im Phytoplankton eingebauten Kohlenstoffs gelangen in die tieferen Schichten, wo er als CO_2 freigesetzt wird, wenn die toten Zellen verwesen (2). Durch diesen Prozess, die »biologische Pumpe«, wird im Effekt CO_2 vorübergehend in der Tiefsee eingelagert. Im Laufe von Jahrhunderten transportieren Aufwärtsströmungen das gelöste Gas und andere Nährstoffe wieder in die lichtreiche Oberflächenschicht.

Ein sehr kleiner Teil der toten Zellen lagert sich am Meeresboden ab und wird zu einem Bestandteil des Sedimentgesteins oder zu Erdöl. Im Verlauf von Jahrmillionen wird der gesteinsgebundene Kohlenstoff weiter umgewandelt und in große Tiefen gedrückt. Ein Teil entweicht bei Vulkanausbrüchen wieder als CO_2-Gas in die Atmosphäre (3). Die Verfeuerung fossiler Brennstoffe beschleunigt diesen Prozess um das Millionenfache (4).

Das Phytoplankton der Meere und die Landpflanzen können das CO_2 nicht schnell genug in Biomasse umwandeln, um diesen Anstieg aufzufangen: Der Kohlenstoffzyklus ist aus dem Gleichgewicht geraten, sodass sich die Erde erwärmt. Es gibt Überlegungen, die Photosyntheseleistung des Phytoplanktons und die Speicherleistung der biologischen Pumpe durch Düngung der Weltmeere mit Eisenlösung künstlich zu steigern.

DAVID FIERSTEIN

Eisendüngung des Phytoplanktons



DAVID FIERSTEIN

RON NICOLAYSEN

▷ (National Oceanic and Atmospheric Administration) belasten Sauerstoffmangel und andere Folgen übermäßigen Nährstoffeintrags bereits jetzt mehr als die Hälfte der Küstengewässer der USA, darunter die berüchtigte »Todeszone« im nördlichen Golf von Mexiko. Dutzende weiterer Meeresregionen in aller Welt kämpfen mit ähnlichen Schwierigkeiten.

Selbst wenn man die möglichen Nebenwirkungen der Düngung abschätzen könnte und für vertretbar hielte: Die Reaktionen der Pflanzen und Meere auf die Klimaerwärmung könnten den erhofften Effekt zunichte machen. Ein Vergleich von Satellitendaten aus den frühen 1980er und den 1990er Jahren lässt zwar darauf schließen, dass die Meere etwas grüner geworden sind, aber eine höhere Produktivität führt nicht zwangsläufig zu einer verstärkten Einlagerung von Kohlenstoff in der Tiefsee. Tatsächlich könnte das Gegenteil eintreten: In manchen Computermodellen des Meeres und der Atmosphäre legt sich eine Schicht weniger dichten Süßwassers aus schmelzenden Gletschern auf das Salzwasser. Wegen der unterschiedlichen Dichten wird die vertikale Vermischung stark behindert. Da das Phytoplankton kaum aufgrund seines Gewichts absinkt, sondern im Wesentlichen mit der Abwärtsströmung mitgenommen wird, würde dadurch die biologische Pumpe ausgebremst und der Abtransport des CO_2 in die Tiefsee reduziert.

Neue Satellitensensoren liefern mittlerweile täglich Daten über die Phytoplanktonpopulationen in aller Welt, und weitere Düngungsexperimente auf kleinen Flächen werden uns wesentliche neue Einsichten in das Verhalten dieser Mikroorganismen vermitteln. Die Vorstellung, man könne das Klima durch groß angelegte, kommerzielle Meeresdüngung stabilisieren, ist hingegen sowohl in der Wissenschaft als auch in der Politik immer noch heftig umstritten. Nach Ansicht vieler Wissenschaftler wiegt der mögliche vorübergehende Nutzen solcher Projekte das unvermeidliche und unkalkulierbare Risiko einer Entgleisung der marinen Ökosysteme nicht auf. Auf jeden Fall ist es eine Ironie der Geschichte, dass wir uns ausgerechnet vom Phytoplankton die Lösung eines Problems erhoffen, das wir durch die Verbrennung seiner fossilen Vorfahren erst in die Welt gesetzt haben. ◁

Paul G. Falkowski ist seit 1998 Professor am Institut für Meeres- und Küstenkunde sowie am Fachbereich Geologie der Rutgers-Universität in New Brunswick (New Jersey). Er stammt aus New York City und promovierte 1975 an der Universität von British Columbia in Vancouver (Kanada). Im Jahre 1997 erfanden er und Zbigniew Kolber von der Rutgers-Universität ein Fluorometer, das die Phytoplanktonaktivität in Echtzeit messen kann. Seine Forschung konzentriert sich auf die Koevolution biologischer und physikalischer Systeme.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

CO_2-Entwicklung und Rolle des marinen Phytoplankton. Von Ulf Riebesell in: José L. Lozán et al. (Hg.): Warnsignal Klima. Geo, 1998.

The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of the Earth as a System. Von Paul G. Falkowski et al. in: Science, Bd. 290, S. 291, 13. Oktober 2000.

The Changing Ocean Carbon Cycle: A Midterm Synthesis of the Joint Global Ocean Flux Study. Von Roger B. Hanson, Hugh W. Ducklow und John G. Field (Hg.). Cambridge University Press, 2000.

Aquatic Photosynthesis. Von Paul G. Falkowski und John A. Raven. Blackwell Scientific, 1997.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Radiostrahlen aus dem All

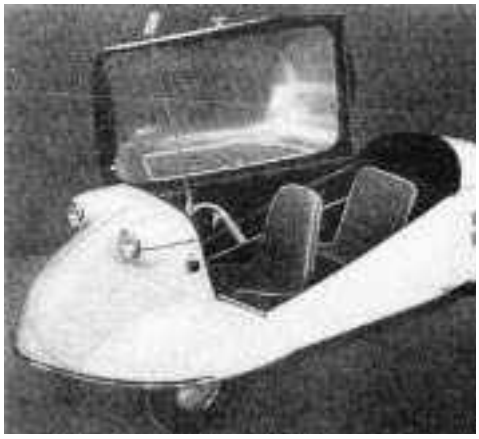
Walter Baade (Mount Palomar Observatorium) teilte mit, daß es gelungen sei, zwei Himmelsobjekte als starke Quellen der kurzwelligen Radiostrahlung mit einem 5-Meter-Spiegel aufzunehmen und zu identifizieren. Die Quelle ist ein Gasmassen-Nebel, der sich … in außerordentlich starker Bewegung befindet. Eine zweite Quelle gehört einem außerhalb unseres Milchstraßensystems liegenden Spiralnebelhaufen an. Baade vermutet, daß hier zwei Spiralnebel … mit einer Relativgeschwindigkeit von mindestens 1000 Kilometer in der Sekunde zusammengestoßen sind – eine kosmische Katastrophe, die sich wahrscheinlich vor 200 Millionen Jahren abgespielt hat. *(Orion, 8. Jg., Nr. 11/12, 1953, S. 499)*

Einstein veröffentlicht Gravitationstheorie

Prof. Albert Einstein hat neue Hypothesen zur Relativitätstheorie veröffentlicht. … Er hält es für möglich, »daß sie eventuell die Grundgesetze des Kosmos des letzten geheimnisvollen Schleiers entkleiden«. … In diesem Anhang zu seinem Werk erweitert und revidiert der Wissenschaftler eine »Vereinheitlichte Feldtheorie«. Er geht davon aus, daß das Schwerkraftfeld und das elektromagnetische Feld zwei Erscheinungsformen einer eigentlich einheitlichen kosmischen Ganzheit seien. Er hat nun neue Gleichungen zur Erläuterung der Beziehungen zwischen diesen Feldern gefunden. *(Universitas, 8. Jg., Heft 6, 1953, S. 658)*

Mit neun PS auf drei Rädern

Schon auf dem »Motor-Roller« kann man – wie es so schön heißt – »im Frack oder im Abendkleid« zu einer Gesellschaft fahren, ohne befürchten zu müssen, beschmutzt einzutreffen. Vorausgesetzt natürlich: gutes Wetter. Das Maicomobil stellt eine ähnliche Lösung dar, … wird für weniger kräftige Personen infolge des Gewichts gelegentlich doch so unhandlich, daß die Benutzung in Frage gestellt wird. Von dieser Erwägung ausgehend, wurde der Fend-Kabinenroller entwickelt, der zudem noch den Vorteil hat, durch den Aufbau völlig witterungsgeschützt zu sein. … Die Höchst- und Dauergeschwindigkeit wird mit 75 km/h angegeben, der Kraftstoffnormverbrauch beträgt 2,3 l auf 100 km. *(Orion, 8. Jg., Nr. 11/12, 1953, S. 503)*



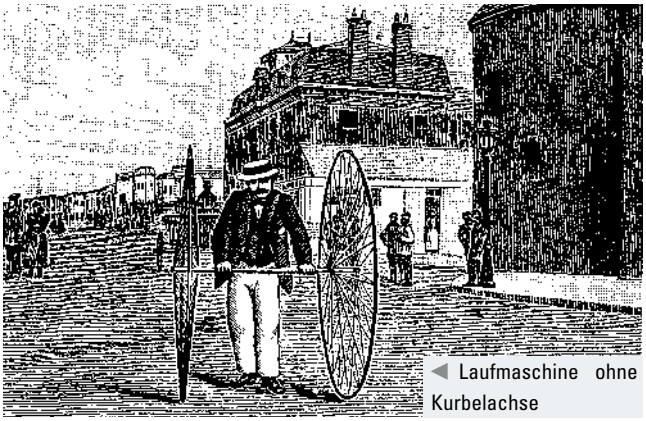
▶ Der Kabinenroller der Messerschmittwerke ist standsicher, bequem und witterungsfest.

Schutzkleidung gegen Hochspannung

Die Gefahren der Hochspannungsleitung für das Publikum sind dank den Fortschritten der Technik als beseitigt zu betrachten, nicht so jedoch für die Bedienungsmannschaft. … Artemieff hat nun einen Weg des Schutzes eingeschlagen: Er umgiebt den Körper mit einem Anzug aus Drahtgeflecht, also einem leitenden Ueberzug, der völlige Bewegungsfreiheit gestattet. … Bei nicht allzuhoher Spannung (bis 100000 V.) kann das Gesicht sogar frei bleiben, ohne dass eine Wirkung in demselben zu verspüren ist. … Die Experimente, die Artemieff an sich bei einer Spannung von 150000 V. ausgeführt hat, dokumentieren die vorzügliche Sicherheit, welche sein Drahtanzug gewährt. *(Naturwissenschaftliche Wochenschrift, Nr. 39, 1903, S. 466)*

Eine »Laufmaschine« zum Fahren

Auf Urtypen des Fahrrads hat neuerdings ein Franzose zurückgegriffen und die hier abgebildete Maschine in zwei Variationen konstruiert. … Das Fahrzeug besteht aus einem großen durch eine Achse miteinander verbundenen Räderpaar, wobei die Achse in den Naben beweglich angeordnet ist. … In den Antriebspausen kann der Fahrer sich lediglich nur durch Auflehnen mit dem Unterleibe auf die Achse über Boden halten. … Dies mochte auch die Veranlassung gewesen sein, daß der »Erfinder« eine zweite Type mit Kurbelachse konstruierte. Bei dieser Maschine kann sich der Fahrer … mit geschlossenen Beinen auf die Ausbiegung der Kurbelachse stellen. Steuern läßt sich das Vehikel natürlich nicht. *(Der Stein der Weisen, Bd. 29, 1903, S. 364)*

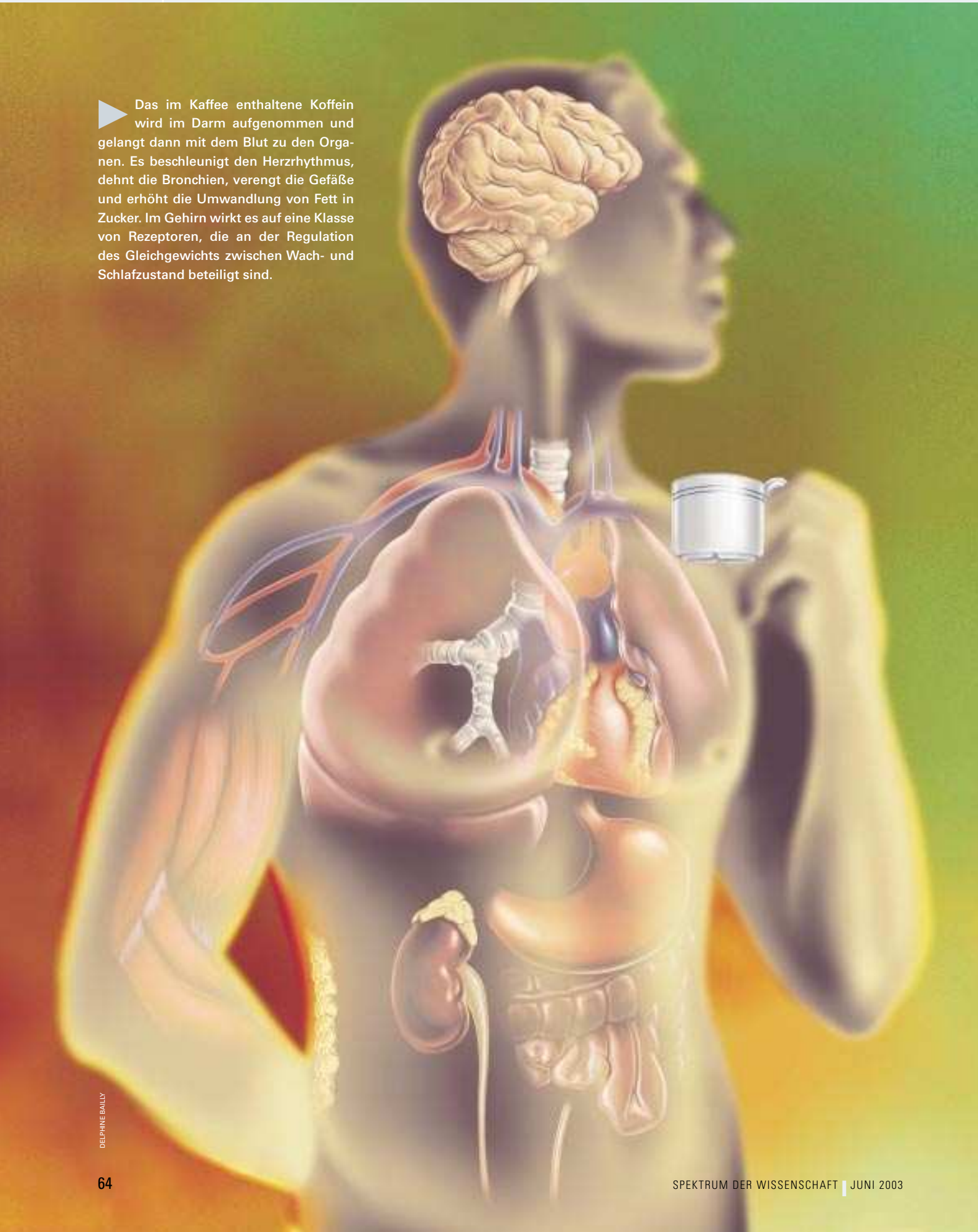


◀ Laufmaschine ohne Kurbelachse

Tunnel von Gibraltar

Ein Unterseetunnel durch die Meerenge von Gibraltar zur Verbindung von Spanien und Marokko wird nach den Plänen des französischen Ingenieurs Jean Berlier geplant. Die Kosten des 41 km langen … Tunnels sind auf nur 153 Millionen Fr. veranschlagt. … Die Meerestiefe erreicht nur 396 m grösste Tiefe, sodass dieser Uebergang, abgesehen von den politischen Erwägungen, trotz der grössern Länge vorteilhafter erscheint als die nur 14 km breite Stelle zwischen Gibraltar und Kap Cires. … Berlier … nimmt als Bauzeit 7 Jahre an. *(Schweizerische Bauzeitung, Bd. XLI, Nr. 23, 1903, S. 264)*

Das im Kaffee enthaltene Koffein wird im Darm aufgenommen und gelangt dann mit dem Blut zu den Organen. Es beschleunigt den Herzrhythmus, dehnt die Bronchien, verengt die Gefäße und erhöht die Umwandlung von Fett in Zucker. Im Gehirn wirkt es auf eine Klasse von Rezeptoren, die an der Regulation des Gleichgewichts zwischen Wach- und Schlafzustand beteiligt sind.



DELPHINE BAILLY

Die Alltagsdroge Koffein

Koffein ist das meistbenutzte Aufputschmittel. Im Gehirn heftet es sich an Rezeptoren, die den Schlaf beeinflussen. Aber auch Blutgefäße und Muskeln sowie Herz, Nieren und weitere Organe reagieren auf die Droge.

Kaffee
Die Alltagsdroge Koffein

Koffein ist das meistbenutzte Aufputschmittel. Im Gehirn heftet es sich an Rezeptoren, die den Schlaf beeinflussen. Aber auch Blutgefäße und Muskeln sowie Herz, Nieren und weitere Organe reagieren auf die Droge.

Von Bruno Sicard

Bei der Arbeit, im Straßenverkehr oder allgemein in Situationen, die hohe Anforderungen an Aufmerksamkeit und Reaktionsvermögen stellen, ist Wachheit gleichbedeutend mit Sicherheit und Leistungsfähigkeit. Mit bestimmten Wirkstoffen kann man den natürlichen Rhythmus von Wachen und Schlafen teilweise beherrschen, wobei jedoch oft Nebenwirkungen auftreten. Koffein ist nicht nur eines der ältesten Aufputschmittel, sondern auch eines der wirksamsten und am besten verträglichen. Die meisten von uns nehmen es täglich in Form einer Tasse Kaffee zum Frühstück zu sich, um die letzten Reste von Müdigkeit abzuschütteln und sich für den Tag fit zu machen.

Wie Koffein diesen Muntermachereffekt und andere Wirkungen ausübt, konnte inzwischen auf physiologischer Ebene geklärt werden. Demnach konkurriert es mit einer körpereigenen Substanz um deren Andockstelle. Wenn es sich daran heftet, sind die Folgen allerdings entgegengesetzt: Statt hemmend wirkt es aktivierend auf eine wichtige Signal- und Reaktionskaskade innerhalb der Zelle.

Auch Pharmakologen interessieren sich schon länger für Koffein. Inzwischen prüft man, inwieweit es sich als Komponente von Psychostimulanzien für all jene Berufsgruppen eignet, bei denen Wachsein oberste Priorität hat. Dabei geht es allem darum, eine Form der Verabreichung zu finden, die eine lange Wirkdauer garantiert und unerwünschte Nebenwirkungen vermeidet. Zu den unliebsamen Folgen von Koffein in hohen Dosen gehören vor allem Harndrang, aber auch Herzrasen, Zittern und Nervosität. Jüngst gelang die Entwicklung eines „Koffeins mit langsamer Freisetzung", das die positiven Effekte optimiert ▷

▷ und die negativen weitgehend ausschaltet.

Siegeszug einer Bohne aus Arabien

Um die Entdeckung des Kaffees ranken sich viele Legenden. Nach einer bemerkte ein Hirte in Jemen, dass seine Schafe in einen ungewohnten Zustand der Aufregung gerieten, sobald sie die Früchte eines bestimmten Gebirgsbaumes fraßen. Er teilte seine Beobachtung einem Mönch aus dem benachbarten Kloster mit, der daraufhin die Beeren sammeln ging, sie trocknete und daraus einen Aufguss zubereitete, den er seinen Mitbrüdern zu trinken gab. Diese waren danach in den nächtlichen Gebeten mit viel mehr Ausdauer und Eifer bei der Sache.

Die ersten schriftlichen Zeugnisse von Kaffee finden sich im 9. und 11. Jahrhundert bei zwei persischen Ärzten: Rhazes (865Ð923) und Avicenna (980Ð1037). Beide erwähnen ein Stärkungsmittel, das aus Jemen stammt.

AKG BERLIN / JAN VAN GREVENBROECK

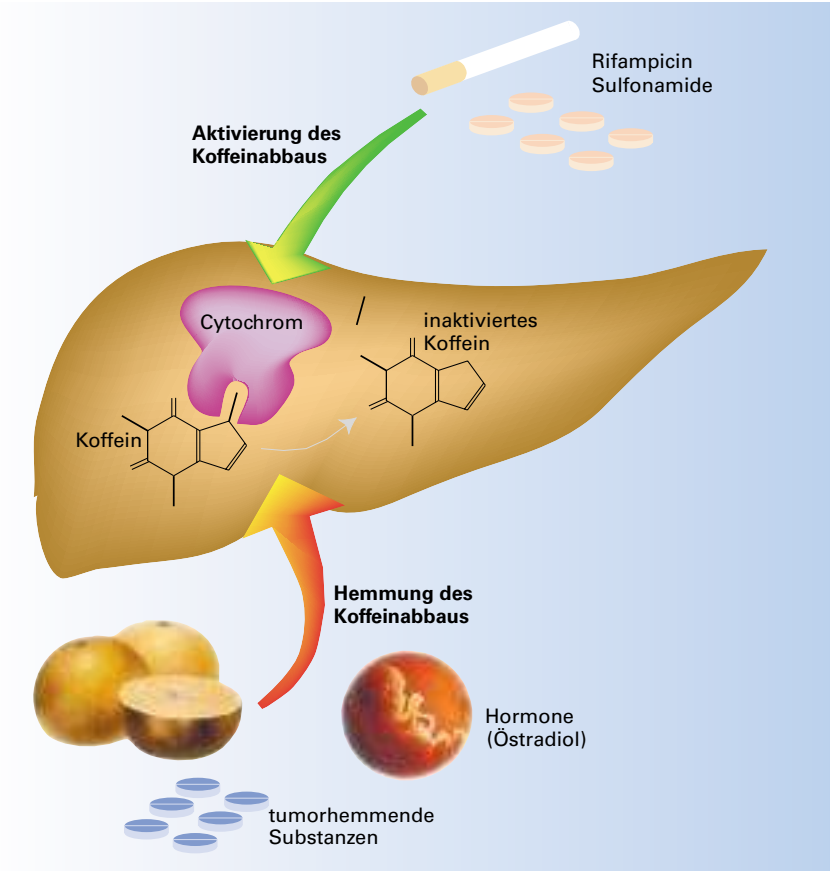
In einem Kaffeehaus in Venedig kosten Adelige aus dem 18. Jahrhundert von einem Luxusprodukt, von dem jeweils nur eine Tasse auf Verlangen zubereitet wird: Kaffee.

Ausfuhrhafen für Kaffee war Al Mukha (das heutige Mokka). Von dort gelangten die Bohnen über Dschidda (im heutigen Saudiarabien), wo sie auf große Schiffe oder Galeeren umgeladen wurden, ins ägyptische Suez. In Ballen von 150 Kilogramm nahm sie dann die Karawanenstraßen nach Kairo oder Damaskus.

Der Verkauf von Kaffee begann in Mekka, der heiligen Stadt des Islam und Ziel moslemischer Pilger. Hier machten die ersten Kaffeehäuser auf. Im 16. Jahrhundert gelangte das Getränk in die Türkei und im Jahr 1615 nach Venedig. Griechische, türkische und armenische Händler brachten es dann nach Frankreich. Als Geschenk des türkischen Botschafters Soliman Afga hielt Kaffee 1669 Einzug am Hof Ludwigs XIV.

Binnen kurzem verbreitete sich das neue Modegetränk über ganz Europa; in allen großen Städten schossen Kaffeeläden aus dem Boden. Auch Beethoven gehörte zu den passionierten Kaffee-Trinkern. Bei der Zubereitung war er äußerst pingelig: Genau 60 Bohnen zählte er für eine Tasse ab. Um das Jahr 1734 schrieb Bach seine „Kaffeekantate"; immerhin pflegte das Bachische Collegium musicum in den Lokalitäten des Leipziger Cafetiers Gottfried

In der Leber wird das Koffein von einem Enzym namens Cytochrom abgebaut. Tabak sowie gewisse Medikamente wie das Antibiotikum Rifampicin und die Sulfonamide stimulieren das Enzym und beschleunigen so den Abbau. Umgekehrt hemmen Hormone wie Östradiol, gewisse Anti-Krebsmittel oder auch Grapefruitsaft das Cytochrom. Das Koffein bleibt dadurch länger im Blut.



POUR LA SCIENCE

Zimmermann aufzutreten. Später trank Balzac bis zu 30 Tassen am Tag und widmete dem Kaffee und seinen Wirkungen eine umfangreiche Abhandlung.

Doch gab es auch ablehnende Stimmen. Der preußische König Friedrich der Große erklärte 1777, mit Kaffee getränkte Soldaten könnten gegen Biertrinker-Truppen keine Schlachten gewinnen. Bei der damaligen Kriegsführung war vielleicht die durch einen leichten Rausch hervorgerufene Euphorie nützlicher als extreme Klarsicht und Wachheit; denn die Infanteristen mussten trotz der Gefahr, von der nächsten Salve niedergemäht zu werden, standhaft weiter vorrücken.

Der französische Kaufmann und Weltreisende Sylvestre Dufour machte im 17. Jahrhundert erste Beobachtungen wissenschaftlichen Charakters über die Wirkungen der schwarzen Bohnen. „Wenn unsere französischen Kaufleute die ganze Nacht arbeiten wollen, trinken sie am Abend eine oder zwei Tassen Cahué", schrieb er. „Nach dem Abendessen verhindert er das Einschlafen, daher wird er dann von Leuten getrunken, die nachts studieren wollen."

Die Fähigkeit des Kaffees, Müdigkeit zu vertreiben, fiel demnach als erste auf. Gleichzeitig berichtete Dufour, dass das Getränk, „nüchtern genossen, sich im Magen in Galle verwandelt und ihn zerfrisst... Daher sieht man jeden Morgen an den Pforten von Kaffeehäusern eine Unmenge von Biscuit- und anderen Gebäckverkäufern." Der Kaufmann konstatierte jedoch auch, dass „der Kaffee in wunderbarer Weise die erste Verdauung unterstützt. Die erste Verdauung ist die Umwandlung der Nahrungsmittel im Magen in eine weiße, flüssige Substanz, Chylus oder Milchsaft genannt."

Hat der Kaffee nun einen schädlichen Einfluss auf die Verdauung oder nicht? Und wie verlängert er den Wachzustand? Erst moderne Untersuchungen haben Antworten auf diese Fragen geliefert. Insbesondere ergaben sie, dass Kaffee eine Mischung von ganz unterschiedlichen Bestandteilen ist, die den Organismus verschieden beeinflussen. So enthält er Mineralsalze, Saccharide (Zucker), Proteine, Lipide (Fettstoffe) und Vitamine. Der aktivste Bestandteil ist allerdings das Koffein.

Das Weckmolekül

Am 3. Oktober 1819 besuchte der „junge Chemikus Runge" Goethe in Jena. Nach Gesprächen über Gifte in Pflanzen, so erinnert sich Friedlieb Ferdinand Runge (1794Ð1867) später, „übergab er (Goethe) mir noch eine

▷

▷ Schachtel mit Kaffeebohnen, die ein Grieche ihm als etwas ganz Vorzügliches gesandt. ‚Auch diese können Sie zu Ihren Untersuchungen brauchen!‘ sagte Goethe. Ð Er hatte recht; denn bald darauf entdeckte ich darin das wegen seines großen Stickstoffgehaltes so berühmt gewordene Koffein". Bei der farblosen, in Wasser und Alkohol löslichen Substanz, die Runge durch eine Serie von Destillationen erhielt, handelt es sich um ein Alkaloid Ð eine Klasse pflanzlicher Naturstoffe, zu denen auch das Nikotin im Tabak, das Theobromin im Kakao und das Theophyllin im Tee gehören.

War Kaffee zu Goethes Zeiten noch ein Luxusartikel, den sich nur Wohlhabende leisten konnten, so ist er heute zum Alltagsgetränk geworden. Weltweit werden täglich eine Milliarde Tassen konsumiert. Jede davon enthält um die 100 Milligramm Koffein Ð eine relativ konstante Dosis, ob man nun Espresso oder Filterkaffee trinkt. Auch die Nahrungsmittelindustrie verbraucht das Aufputschmittel. So werden Cola-Getränke und „Energydrinks" damit versetzt: Der Koffeingehalt eines Liters entspricht dem einer Tasse Kaffee. Ebenso befindet sich die Substanz in Schokoriegeln; ihre Menge erreicht hier etwa ein Fünftel derjenigen in einer Tasse Kaffee. Im übrigen enthalten auch zahlreiche Medikamente Koffein. Das gilt vor allem für Mittel gegen Migräne, Schmerzen und Fieber. Die Höchstmenge in einer solchen Tablette entspricht dem Gehalt einer Tasse Kaffee.

Für Kinder ist das „versteckte" Koffein nicht unproblematisch. Drei Dosen Cola und drei Schokoriegel enthalten das Äquivalent von zwei Tassen Kaffee. Ein 30 Kilogramm schweres Kind erreicht damit eine Konzentration von sieben Milligramm Koffein pro Kilogramm Körpergewicht. Für ähnlich hohe Werte braucht ein Erwachsener vier bis sechs Tassen Kaffee. Da ist es kein Wunder, wenn ein solches Kind Schlafprobleme bekommt.

Koffein im Blutkreislauf

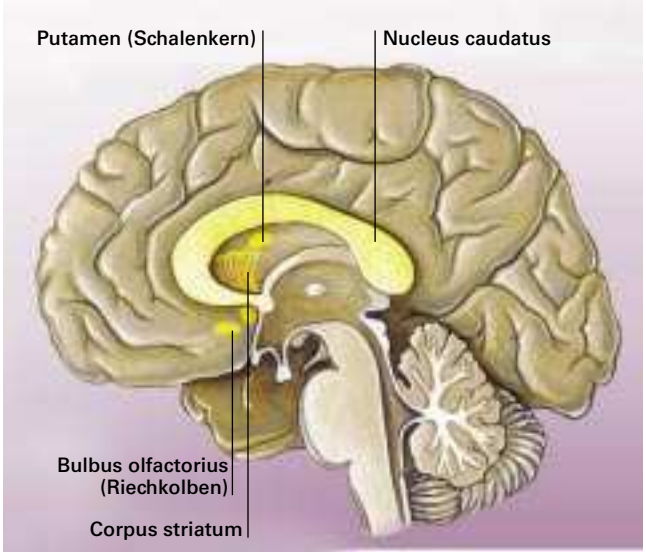
Die Resorption von Koffein findet teilweise im Magen, hauptsächlich aber im Darm statt. Das Blut befördert den Stoff dann zu den verschiedenen Organen. Wie schnell das Koffein vom Körper aufgenommen wird, hängt vom Mageninhalt ab. Eine reichhaltige Mahlzeit braucht mehrere Stunden, bis sie verdaut ist und in den Darm weiter wandert. Dadurch verlängert sich zugleich die Verweilzeit des Kaffees im Magen, und das Koffein wird langsamer resorbiert. Denselben Effekt hat, wenngleich in geringerem Maße, die Zugabe von Milch; denn Milch ist alkalisch und reich an Proteinen, Galaktose und Fetten, was gleichfalls die Entleerung des Magens verlangsamt. Aus ähnlichen Gründen tritt das Molekül auch dann verzögert in den Blutkreislauf über, wenn es mit kohlensäurehaltigen Getränken statt mit Tee oder Kaffee aufgenommen wird.

Erst einmal in den Adern angelangt, erreicht das Koffein in weniger als fünf Minuten die Organe und das Nervensystem. Allerdings wird rund ein Drittel der Menge im Blutplasma an Proteine wie Albumin gebunden und bleibt inaktiv. Bei älteren Menschen enthält das Blut weniger Eiweißstoffe, weil ihr Proteinstoffwechsel verlangsamt ist: Die Leber bildet nicht mehr so viel Proteine, und die Nieren lassen mehr davon passieren. Daher ist bei diesen Menschen der Anteil an freiem Koffein im Blut höher und die anregende Wirkung entsprechend stärker.

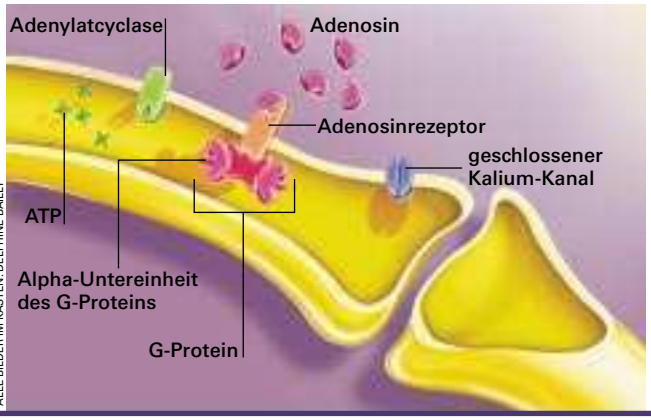
Wie stark die Droge wirkt, hängt aber auch davon ab, wie schnell sie wieder abgebaut wird. Der Abbau geschieht in der Leber, wo Enzyme jene Methylgruppen vom Molekül entfernen, die ihm seine Aktivität verleihen. Im Durchschnitt ist die Koffeinmenge im Blut nach etwa vier Stunden auf die Hälfte gesunken.

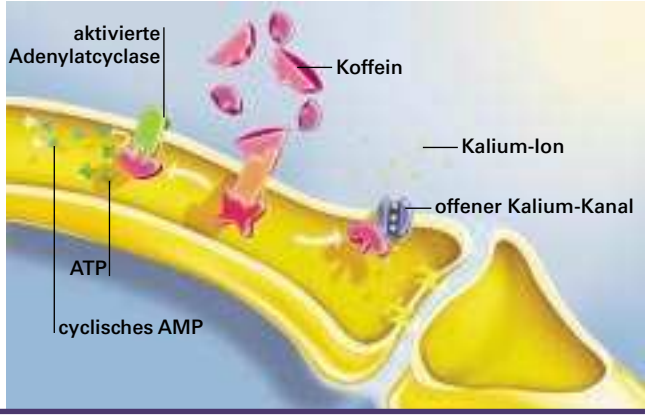
Die Aktivität der abbauenden Enzyme in der Leber variiert allerdings von Mensch zu Mensch und hängt zudem von diversen Umweltfaktoren ab. So wird sie durch polycyclische Kohlenwasserstoffe gesteigert, die im Zigarettenrauch enthalten sind. Raucher scheiden Koffein deshalb schneller aus. Auch bestimmte Medikamente enthalten Stoffe, welche die Leberenzyme anregen und

Übernahme der Kommandogewalt



Die Wirkung von Koffein beruht darauf, dass es sich an Adenosinrezeptoren heftet. Diese sind in sehr vielen Hirnregionen anzutreffen (links oben, gelb). Adenosin ist das Abbauprodukt von Adenosintriphosphat (ATP), der Energiewährung des Organismus. Liegt es im Überschuss vor, sättigt es seine Rezeptoren, die auf der Oberfläche der Nervenzellen sitzen (links unten). Dadurch unterbindet es die Kaskade der intrazellulären Reaktionen; denn die G-Proteine, das erste Glied der Kette, bleiben an die Rezeptoren geheftet. Bei Einnahme von Koffein verdrängt dieses das Adenosin von dessen Rezeptoren (unten rechts). Dadurch werden die Alpha-Untereinheiten der G-Proteine freigesetzt, die sich dann an die Adenylatcyclase heften und sie so aktivieren. Das Enzym wandelt daraufhin ATP in cyclisches Adenosinmonophosphat (cAMP) um, was die Zellaktivität verändert. Bei hoher Koffeinkonzentration können auch Kalium-Kanäle geöffnet werden und die Übertragung von Nervensignalen modulieren.





ALLE BILDER IM KASTEN: DELPHINE BAILLY

so den Abbau der Droge beschleunigen.

Umgekehrt verhalten sich gewisse Hormone wie Östradiol, die in der Antibabypille enthalten sind: Sie senken die Aktivität der Enzyme. Sie werden nämlich auch von ihnen abgebaut, sodass sie einen Teil davon belegen, der dann nicht mehr für das Koffein zur Verfügung steht. Dieses bleibt daher länger im Blut. Aus demselben Grund kann bei schwangeren Frauen manchmal eine einzige Tasse Kaffee einen ganzen Tag lang wirken. Außerdem hat das Koffein, das sehr leicht in alle Geweben diffundiert, im Blut von Mutter und Fötus dieselbe Konzentration. Man kann schwangeren Frauen also nur raten, möglichst auf den Genuss von Kaffee zu verzichten.

Der zentrale Wirkmechanismus

Bevor ich nun die Wirkungen des Koffeins näher beschreibe, möchte ich kurz auf einen vermeintlichen negativen Effekt eingehen, der ihm gelegentlich zugeschrieben wird und den auch Dufour im obigen Zitat erwähnte. Manchmal hat man den Eindruck, dass zu viel Kaffee im Laufe des Tages die Verdauung beeinträchtigt und Sodbrennen verursacht. Das kann jedoch nicht dem Koffein angelastet werden; denn bei entkoffeiniertem Kaffee treten die gleichen Symptome auf. Kaffee ist eine komplexe Mischung aus Hunderten von Substanzen, von denen einige auf das Verdauungssystem wirken. Sie verursachen insbesondere eine Kontraktion der Gallenblase sowie die Ausscheidung von Pankreassaft und einen Anstieg in der Konzentration der Verdauungshormone Cholezystokinin und Gastrin. Letzteres regt die Sekretion von Magensäure an und aktiviert die Magendarmbewegung, sodass

es zu Übersäuerung und Reflux in die Speiseröhre führen kann. Koffein ist daran nicht beteiligt.

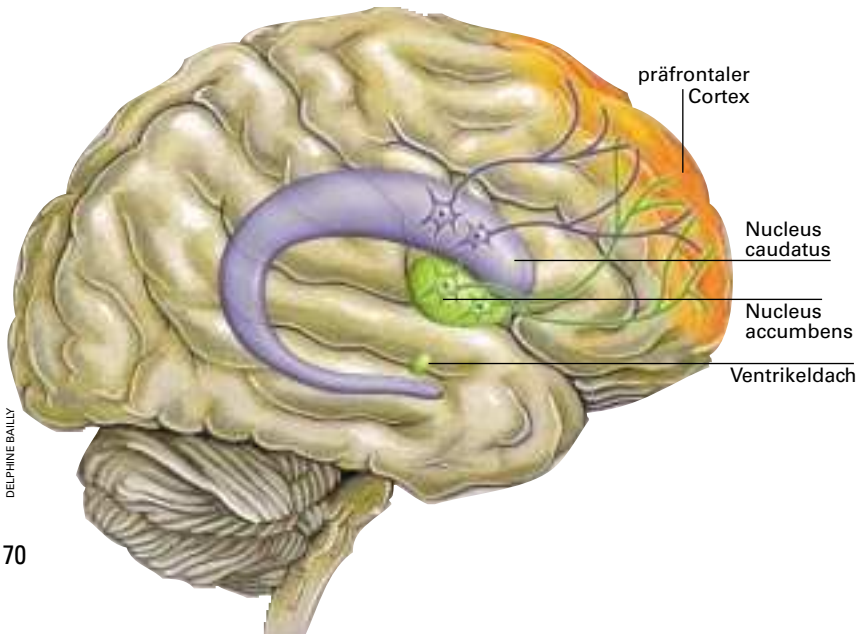
Was aber sind seine eigentlichen Wirkungen und wie ruft es sie hervor? Es gibt einen Hauptmechanismus, über den Coffein die verschiedensten Organe und Gewebe beeinflusst: Es bindet sich an die Andockstellen für Adenosin. Dieses kleine, im Organismus allgegenwärtige Molekül bildet sich überall dort, wo der zellinterne Energieträger Adenosintriphosphat (ATP) verbraucht wird, dessen Zersetzungsprodukt es ist. Wenn sich Adenosin an seine Rezeptoren bindet, hemmt es das Enzym Adenylatcyclase. Heftet sich an seiner Stelle dagegen das Koffein an dieselben Rezeptoren, hat das die entgegengesetzte Wirkung: Die Adenylatcyclase wird aktiviert (siehe Bild (4)). Als Folge davon löst sie die Bildung des chemischen Botenstoffes cAMP (cyclisches Adenosinmonophosphat) aus, der seinerseits so genannte Proteinkinasen aktiviert.

Diese Signalkaskade hat in verschiedenen Geweben unterschiedliche Folgen. In Muskeln beeinflussen die Proteinkinasen die Kontraktion der Fasern. Allerdings hängt die Art des Effekts vom Muskeltyp ab. Die glatten Muskelfasern der Blutgefäßwände werden veranlasst, sich zusammenzuziehen, sodass der Blutdruck steigt. Dagegen dehnen sich die quergestreiften Fasern der Atmungsmuskeln aus; diese so genannte Bronchodilatation erleichtert den Atmungsvorgang.

Außerdem kurbelt Koffein den Fettstoffwechsel an. Das cAMP, dessen Synthese es durch Bindung an die Adenosinrezeptoren in Gang setzt, stimuliert nämlich die Lipasen, also die Enzyme für den Abbau von Fett. Diese transformieren es in energiereiche Stoffwechselprodukte, was eine zusätzliche Möglichkeit zur Energiegewinnung darstellt Ð außer dem Verbrauch von Zucker und dem Abbau von Glykogen, der Zuckerreserve des Organismus.

Als Folge davon hat Koffein auch „Doping"-Eigenschaften. Den Beweis lieferten unter anderem Experimente, bei denen sitzende Versuchspersonen ein am Knöchel befestigtes Gewicht bei gestrecktem Bein in der Luft halten sollten. Die Zeitspanne, während der sie das schafften, war um gut 15 Prozent länger, wenn sie eine Stunde zuvor drei bis vier Tassen Kaffee getrunken hatten.

Aus diesem Grund betrachten auch Sportler Koffein als Doping-Mittel, das die Atmungskapazität und die Ausdauer erhöht. Allerdings muss man, um in flagranti erwischt zu werden, mehr als fünf Tassen Kaffee an einem Tag trinken. Das Team des niederländischen Triathleten und Radsportlers Asker Jeukendrup, der an der Universität Birmingham Trainingsphysiologie und Ernährung für Sportler lehrt, hat auf einem virtuellen Radkurs über vierzig Kilometer den Nutzen diverser Maßnahmen ermittelt. Seiner Computersimulation zufolge ist Training immer noch am effektivsten: Es verbessert die Zeit um eine



DELPHINE BAILLY

Koffein aktiviert ein anderes Neuronensystem als harte Drogen wie Heroin, Kokain und Nikotin. Diese stimulieren ein Zentrum namens Nucleus accumbens, das zu einem positiven Verstärkersystem (»Belohnungsschaltkreis«) gehört. Im Gegensatz dazu regt Koffein den Nucleus caudatus (Schweifkern) an. Da beide Neuronensysteme in derselben Cortexgegend enden, ist zwar auch Koffeinkonsum mit Lustgewinn verbunden; dennoch löst er höchstens eine sehr schwache Abhängigkeit aus.

bis sieben Minuten. Mit einer aerodynamisch günstigen Haltung lassen sich gleichfalls einige Minuten gewinnen. Aber auch mäßige Dosen Koffein bringen immerhin 55 bis 84 Sekunden, während ein längerer Aufenthalt in der Höhe als Vorbereitung nur rund 30 Sekunden einträgt.

Indem Koffein die Blutgefäße verengt, vermindert es zugleich die Durchblutung des Gehirns und damit dessen Versorgung mit Glucose. Das Gehirn reagiert äußerst empfindlich auf eine Hypoglykämie, also den Abfall des Blutzuckerspiegels unter Normalwerte. Lange bevor die Muskeln dieses Energiedefizit bemerken, kommt es zu Kopfschmerzen, Schweißausbrüchen und Schwindel- oder gar Ohnmachtsanfällen. Koffein verstärkt die Wirkung einer Unterzuckerung auf das Gehirn noch, sodass sich die Alarmsignale vorzeitig einstellen. Deshalb empfiehlt man Personen mit dem Risiko einer Hypoglykämie die Droge in mäßigen Dosen Ð vor allem jenen, die Antidiabetika einnehmen.

Was verursacht die harntreibende Wirkung von Koffein? Letztlich ist es ein indirekter Effekt, der auf der Kontraktion der Gefäßwände beruht. Als Reaktion auf den erhöhten Blutdruck steigern die Nieren den Filtrationsdur chsatz und verringern so das Blutvolumen. Bei drei Tassen Kaffee in zwei Stunden steigt die Urinmenge um 30 Prozent.

Regulation des Schlafes

Doch kommen wir nun zur wichtigsten Eigenschaft von Koffein: seiner Fähigkeit, wach zu halten. Auch diese Wirkung beruht auf seiner Bindung an den Adenosin-Rezeptor. Dessen Rolle beim Schlafen wird schon seit fast einem Jahrhundert erforscht. Im Jahre 1912 hielten die Physiologen René Legendre und Henri Piéron Hunde mehrere Tage lang künstlich wach. Anschließend entnahmen sie ihnen Hirn-Rückenmarks-Flüssigkeit (Liquor cerebro-spinalis) und injizierten sie in das Gehirn von gerade geweckten Tieren. Diese schliefen daraufhin sofort wieder ein. Demnach sammeln sich im Wachzustand im Gehirn Substanzen an, die quasi „Sandmännchen" spielen. Seit den 1970er Jahren mehrten sich die Hinweise, dass es sich bei einer dieser Substanzen um Adenosin handelt.

Den Beweis dafür lieferten 1997 Tarja Porkka-Heiskanen und ihre Kollegen an der Universität Helsinki. Sie ließen Katzen stundenlang ununterbrochen spielen und hinderten sie so am Einschlafen. Gleichzeitig maßen sie mit Hilfe von Sonden, die sie durch die Schädeldecke eingeführt hatten, die Adenosin-Konzentration im Gehirn. Diese nahm stetig zu, während die Katzen in ihrem künstlichen Wachzustand von Stunde zu Stunde immer müder wurden. Sobald die Tiere jedoch einschliefen, sank sie wieder.

Je länger man wach ist, desto

MARINE NATIONALE

mehr Adenosin sammelt sich also im Gehirn an: es bildet eine Art „Müdigkeitssignal". Indem es seine Rezeptoren zunehmend sättigt, hemmt es die Adenylatcyclase immer stärker, sodass die Produktion von cAMP stetig abnimmt. Verschiedene molekulare Kaskaden verursachen daraufhin kritische Veränderungen in den Wach- und Schlafzentren und lassen das Gleichgewicht vom Wach- in den Schlafzustand umkippen.

Adenosin ist folglich ein hochwirksamer Regulator des Schlafbedürfnisses. Weil es

Bruno Sicard ist Chefarzt im Bereich »Menschliche Faktoren« innerhalb der Abteilung »Programme« beim Führungsstab der französischen Marine.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Décalage horaire, mélatonine et caféine à liberation prolongée. Von M. Beaumont et al. in: Médicine et armées, Bd. 30, S. 135 (2002).

Slow-Release Caffeine: a New Response to the Effects of a Limited Sleep Deprivation. Von D. Lagarde et al. in: Sleep, Bd. 23, S. 5 (2000).

The Effects of 600 mg of Slow Release Caffeine on Mood and Alertness. Von B. Sicard in: Aviation Space and Environmental Medicine, Bd. 67, S. 859 (1996).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Karosse in der Nasszelle

Die Lackierung eines Autos baut sich aus mehreren Schichten auf

Von Frank Huber

Schutz gegen Korrosion und eine ansprechende Optik, das sind die wichtigsten Funktionen der etwa 90 000 Tonnen Lack, die pro Jahr in Deutschland auf fast 6 Millionen Neuwagen aufgetragen werden. Jede Karosserie durchläuft dabei nicht weniger als fünf verschiedene Beschichtungsprozesse, bevor ihre neue Außenhaut allen technischen und visuellen Anforderungen genügt.

Autolacke bestehen üblicherweise aus mehreren leichtflüchtigen Komponenten, heute meist auf Wasserbasis, und nichtflüchtigen Bestandteilen, die nach dem Aushärten des Lacks auf der Karosserie verbleiben: Bindemitteln, Pigmenten, Füll- und Hilfsstoffen. Damit eine Mischung dieser Substanzen dauerhaft auf Metall haftet, muss dieses vorbehandelt werden. Eine phosphorsäurehaltige Lösung raut dazu seine Oberfläche auf und erzeugt eine Schicht aus Phosphaten, beispielsweise bei einer bereits verzinkten Karosserie aus Zinkphosphat sowie Phosphaten von Mangan und Nickel. Weil deren Kristallgitter dem des Metalls sehr ähnelt und die Sauerstoffatome der Phosphatgruppen eine große Neigung zur Bindung an das Metall aufweisen, haftet ein solcher Untergrund besonders zuverlässig. Andererseits vermittelt er auch zum Epoxidharz der Grundierung eine gute Adhäsion, denn dessen elektrisch polare Gruppen wechselwirken mit dem Phosphat.

In einem Bad wird diese Grundierung elektrochemisch aufgetragen (siehe Grafik oben). Sie trägt den Hauptanteil am Korrosionsschutz. Unebenheiten gleicht ein Füllerlack aus. Seine Bindemittel sind Polyester oder Polyurethane, ihre Elastizität macht den gesamten Schichtaufbau unempfindlicher gegen Stein- und Splittschlag.

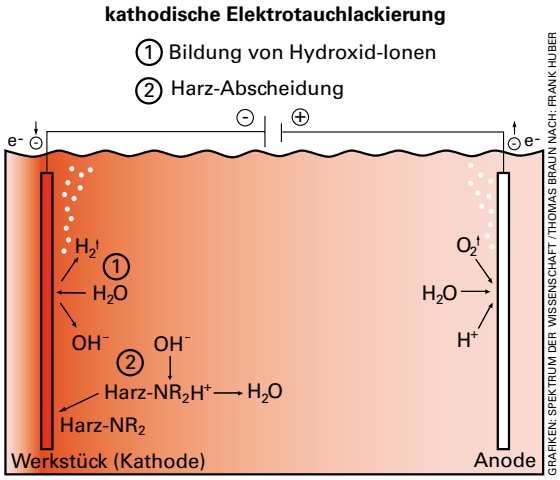
Erst der nun folgende Basislack gibt der Lackierung ihre Farbe oder ruft besondere Lichteffekte hervor. Unilacke enthalten Buntpigmente, Metalliclacken setzen die Hersteller mikroskopische Aluminiumplättchen zu, für Perlglanz oder Farbflop – Farbänderungen je nach Betrachtungsrichtung – zeichnen metalloxidbeschichtete Glimmerpartikel verantwortlich (Spektrum der Wissenschaft, Spezial Farben, 4/2000; Spektrum der Wissenschaft 10/1997, S. 99). Prestigeträchtige Sonderlackierungen, die das Changieren von Seidenstoffen oder das Schillern von Schmetterlingsflügeln nachahmen, kosten oft einige tausend Euro mehr als die Standardausführung.

Eine Klarlackschicht auf Acrylat-Grundlage versiegelt schließlich den Basislack und verleiht ihm Glanz, Witterungsbeständigkeit und in gewissem Maße auch Kratzfestigkeit.

Füller, Basis- und Klarlack werden zum größten Teil elektrostatisch von Automaten in Reinraumkabinen aufgesprüht, jeder an einer eigenen Station (siehe Grafik ganz rechts). Üblicherweise verfügt jede über einen »Dachautomaten« mit drei Zerstäubereinheiten für die Lackierung von Motorhaube, Dach und Heckklappe sowie zwei »Seitenautomaten« mit je drei Einheiten für die seitlichen Karosserieteile. Die elektrostatischen Sprühtechniken arbeiten äußerst effektiv: Etwa neunzig Prozent des eingesetzten schichtbildenden Materials kommen tatsächlich auf der Karosserie an.

Die einzelnen Lackschichten härten bei 120 bis 180 Grad Celsius in Durchlauftrocknern mit Umluft oder Wärmestrahlung aus. Grundierung, Füller und Klarlack werden außerdem an verunreinigten Stellen geschliffen und gesäubert (der Basislack würde durch das Schleifen unschöne Riefen zeigen). Bis eine Karosserie diese Abfolge durchlaufen hat, vergeht heutzutage etwa eine Arbeitsschicht von sieben Stunden.

Der promovierte Chemiker **Frank Huber** leitet das Zentrallabor eines Unternehmens der Kunststoffindustrie. Er war zuvor in der Lackiererei eines Automobilherstellers tätig.



GRAFIKEN: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / THOMAS BRAUN NACH: FRANK HUBER

Um Außenflächen und auch Hohlräume einer Karosserie zu grundieren, wird sie in einem Becken mit Elektrotauchlack geflutet und an eine negative Spannung (Kathode) angeschlossen. Der Lack besteht zu etwa achtzig Prozent aus Wasser und enthält positiv geladene Epoxidharz-Partikel (Harz-NR_2H^+) als Bindemittel. An der Metalloberfläche entstehen nun durch elektrolytische Spaltung des Wassers negativ geladene Hydroxid-Ionen, die die Harz-Partikel entladen (Harz-NR_2). Sie werden unlöslich und scheiden sich ab. Die Grundierungsschicht wächst so lange, bis ihre isolierende Wirkung den Stromfluss unterbindet.

WUSSTEN SIE SCHON?

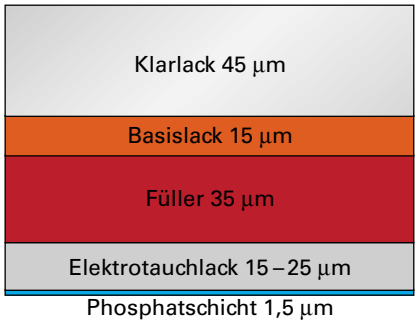
Wasserbasislacke enthalten immer noch 10 bis 15 Prozent organische Lösemittel, Wasserfüller fünf bis sieben Prozent. Diese Lacke ergeben nur dann optimale Resultate, wenn Temperatur, Luftfeuchtigkeit und sogar die Luftgeschwindigkeit in der Lackierkabine genau und konstant gehalten werden. Typische Werte sind: 23 +/-3 Grad Celsius und 65 +/-5 Prozent Feuchtigkeit.

Von etwa **15 Kilogramm flüssiger Beschichtungsmittel** verbleiben nach dem Einbrennen und dem damit verbundenen Abdunsten von Lösemitteln und Wasser rund acht Kilogramm als Feststoff auf dem Metall.

Mit den **Nitrolacken**, Lösungen von Nitrozellulose in organischen Estern, begann in den 1920er Jahren die Fließbandlackierung von Kraftfahrzeugen, fast vierzig Jahre nach den ersten motorisierten »Velocipeden« von Carl Benz. Nach dem Aufspritzen waren die Lackschichten innerhalb weniger Minuten trocken und schleifbar, erlaubten also kurze Taktzeiten.

Metalleffektlacke glänzen nur dann, wenn sich die 25 bis 45 Mikrometer großen Aluminiumplättchen im nassen Lackfilm parallel zur Oberfläche ausrichten. Hohe Flüssigkeitsanteile und dadurch starke Schrumpfung beim Trocknen erleichtern diese Orientierung, Additive verhindern ein Verwirbeln.

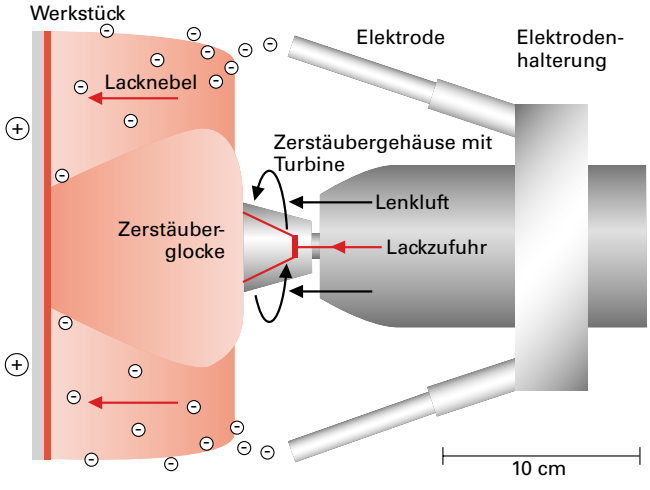
Lackaufbau



Der Lackaufbau eines Automobils besteht aus fünf stets nur wenige Mikrometer dicken Schichten.

Eine mit 20 000 – 40 000 Umdrehungen pro Minute um ihre Längsachse rotierende Glocke zerstäubt Lack zu einem feinen Nebel und schleudert die Tröpfchen zu einem Kranz von Elektroden. Dort werden sie mit Ionen aufgeladen, die an den Elektrodenspitzen in einer Gasentladung entstehen. Vom geerdeten Werkstück angezogen und durch einen Luftstrahl gelenkt, bewegt sich die Lackwolke zur grundierten Karosserie. Im Takt von zwei bis fünf Minuten trägt ein solcher »elektrostatisch unterstützter Hochrotationszerstäuber« bis zu einem halben Liter Beschichtungsstoff auf die Karosserie auf.

elektrostatische Sprühlackierung



Die Kolam-Figuren Südindiens

Die Schwellenzeichnungen von Tamil Nadu sind über Jahrhunderte hinweg nur mündlich überliefert worden; aber in ihnen steckt Mathematik, die erst durch moderne Konzepte der theoretischen Informatik zutage gefördert wird.

Von Marcia Ascher

Nach alter Tradition wischen die Frauen im südindischen Bundesstaat Tamil Nadu jeden Morgen den Boden vor ihrer Haustür, bespritzen ihn mit einer Lösung aus Kuhdung und Wasser und verzieren ihn mit kunstvollen, symmetrischen Figuren aus Reismehl, den *kolam*. Sie lassen das Mehl zwischen Zeige- und Mittelfinger durchrieseln, während sie seine Menge mit dem Daumen dosieren. Nach der überlieferten Vorstellung dient der Kuhdung der Reinigung des Bodens, während die Verteilung des Reismehls den Tag mit einem Akt der Freundlichkeit gegenüber Ameisen und anderen Insekten eröffnet. Die jungen Mädchen lernen das Ritual von ihren weiblichen Verwandten (Bild oben). Seine Beherrschung gilt als Zeichen von Anmut, Geschicklichkeit, geistiger Disziplin und Konzentrationsfähigkeit und damit auch als Kriterium für die Eignung zur Schwiegertochter.

Die *kolam*, die täglich aufs Neue die Eingangsbereiche der Häuser zieren, sind neben ihrer kulturellen Bedeutung auch Ausdruck mathematischer Ideen an unerwarteter Stelle. In letzter Zeit ist es theoretischen Informatikern gelungen, die Bilder mit Mitteln ihres Fachs zu beschreiben und zu analysieren.

Im Bewusstsein ihrer Schöpferinnen sind diese Ideen offensichtlich nicht in einer Form gegenwärtig, die auch nur entfernt der mathematischen Formelsprache ähnlich wäre. Es handelt sich um Ethnomathematik, das heißt Ausdrucksformen mathematischer Ideen abseits der etablierten Wissenschaft. In aller Regel sind diese kulturellen Errungenschaften nur mündlich überliefert.

Mathematik ohne Formeln …

Unter »mathematisch« will ich vorläufig alle Konzepte verstehen, die von Zahlen, Logik und räumlichen Konfigurationen handeln, sowie vor allem die Einordnung dieser Konzepte in Systeme und Strukturen. Kulturelle Tätigkeiten mit mathematischem Gehalt sind zum Beispiel das Führen von Listen, das Erstellen von Kalendern, das Planen und Errichten großer Gebäude, Ornamentik, Navigation, Kartografie, die Klassifizierung von Verwandtschaftsverhältnissen, Weissagung und manche religiösen Praktiken. Von besonderem Interesse sind die Fälle, in denen die Vertreter der Kultur selbst die mathematischen Ideen als bedeutend ansehen und auf deren Weitergabe an ihre Nachfahren großen Wert legen.

Im Prinzip kann immer dann Mathematik ins Spiel kommen, wenn ein Gegenstand des natürlichen, des übernatürlichen oder des zwischenmenschlichen Lebens nach den Kriterien Zeit, Raum oder Struktur beschrieben und analysiert wird. Die Inkas pflegten Zahlen durch farbige, verknotete Schnüren auszudrücken. Die Bewohner der Marshall-Inseln fertigten »Seekarten«, zweidimensionale Konstrukte aus Palmzweigen und Kokosfasern, mit denen sie sowohl die Lage der Inseln als auch die Meeresströmungen zwischen ihnen dokumentierten. Die Weissager auf Madagaskar legen Körner nach einem komplizierten Algorithmus aus, der logische Verzweigungen enthält. Diese drei Beispiele habe ich selbst eingehend untersucht.

MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON K. L. KAMAT

Im südindischen Bundesstaat Tamil Nadu lehren die Mütter ihre Töchter die Tradition der dekorativen Schwellenzeichnungen *(kolam)*.

Im Allgemeinen nimmt die etablierte Wissenschaft kaum Notiz von der Ethnomathematik. Die *kolam* bilden in dieser Hinsicht eine bemerkenswerte Ausnahme. Die komplizierten Figuren liefern den Informatikern willkommenes Material, ihre Techniken der Bildbeschreibung und -analyse anzuwenden und gelegentlich sogar weiterzuentwickeln.

… aber mit reicher Tradition

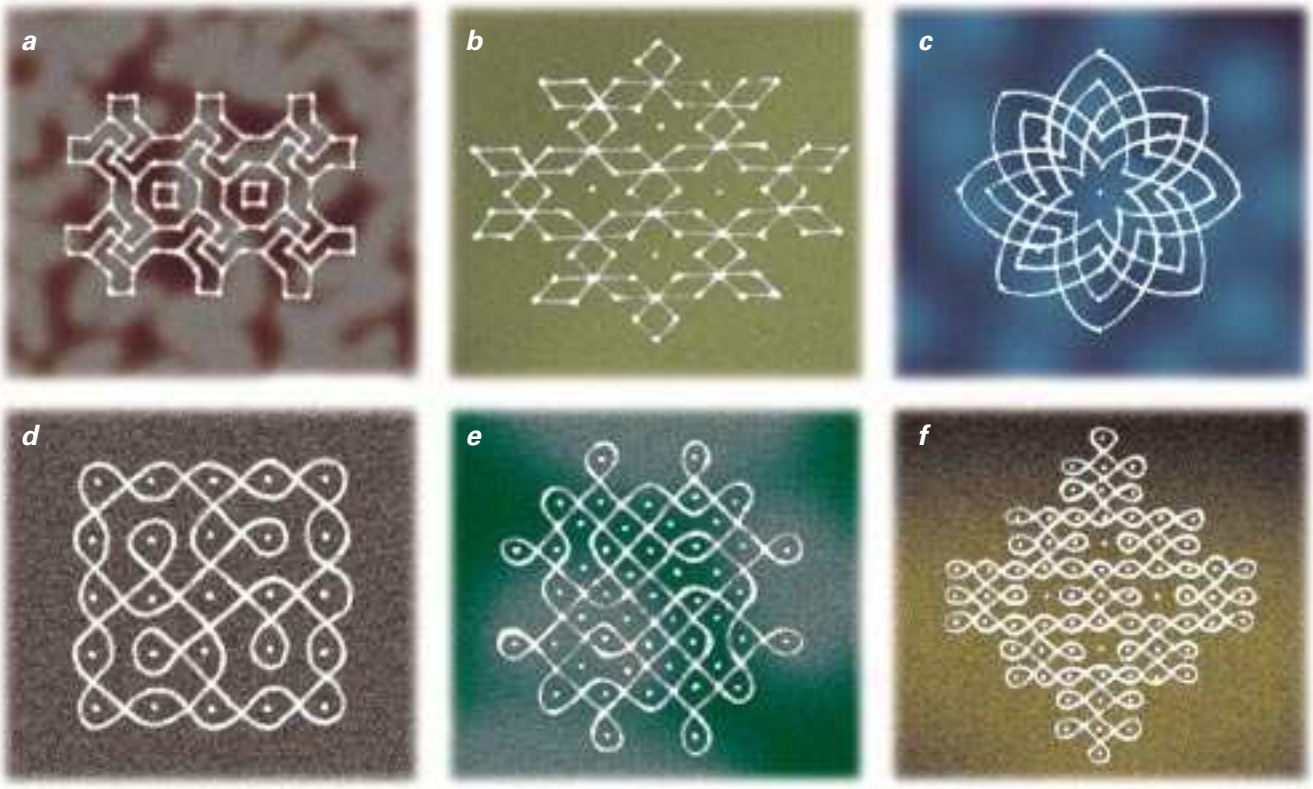
Die Tradition der *kolam* von Tamil Nadu besteht seit Jahrhunderten und wird heute noch praktiziert, auf dem Land wie in der Stadt und von Angehörigen aller Bildungsstufen gleichermaßen. Neuerdings verwenden die Frauen anstelle von Reismehl häufig industriell gefertigtes Steinpulver, Kreide oder dickflüssigen Farbstoff.

Die tägliche Anfertigung der Zeichnungen ist ein wichtiger Teil der tamilischen Kultur. Die geschmückten Flächen dienen als Grenze zwischen Innen- und Außenwelt. Sie können sowohl das Haus beschützen als auch Besucher willkommen heißen. Die Frauen vermitteln den jungen Mädchen eine große Palette verschiedener Zeichnungen samt den zugehörigen Techniken und ihrer Bedeutung: Manche *kolam* sind für den alltäglichen Gebrauch bestimmt, andere besonderen Anlässen vorbehalten.

Die tamilische Kultur ist zwar alles andere als schriftlos: Es gibt eine umfangreiche Literatur, die bis auf das dritte oder vierte vorchristliche Jahrhundert zurückgeht. Gleichwohl wird die Tradition der *kolam* nur mündlich von Mutter zu Tochter weitergegeben; in der Literatur finden sich lediglich sehr knappe und vage Erwähnungen. Immerhin gibt es schriftliche Zeugnisse für die Langlebigkeit und Allgegenwart der Tradition. So berichtet eine der ältesten bekannten Quellen aus dem 16. Jahrhundert von einem friedlichen und blühenden Königreich, in dem »der Tiger und die Kuh von der gleichen Quelle tranken, die Brahmanen aus den Weden rezitierten, die Frauen die Straßen mit *kolam* verzierten, der Regen zur rechten Zeit fiel und die Hungrigen gesättigt wurden«.

In anderen Regionen Indiens gibt es ähnliche Traditionen mit Namen wie *muggu*, *rangoli* und *alpana*. Sie haben höchstwahrscheinlich gemeinsame Wurzeln; allerdings sind die Zeichnungen, ihre Herstellungstechniken und ihre Bedeutung verschieden. In letzter Zeit haben sich die Traditionen und damit auch die Bezeichnungen teilweise vermischt. In diesem Artikel möchte ich mich auf *kolam* der ursprünglichen Art beschränken; sie bestehen nur aus weißen Linien oder weißen Linien und Punkten, die Labyrinthe oder Netze bilden.

Da die Frauen von Tamil Nadu die Tradition auch fern ihrer Heimat beizubehalten pflegen, findet man Kolam-Figuren unter den Nachfahren der im 19. Jahrhundert eingewanderten Teepflücker von Sri Lanka ebenso wie unter den Einwanderern in den Vereinigten Staaten. Sie sind unzertrennlich mit den Werten und philosophischen Vorstellungen der ▷



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON K. L. KAMAT

Kolam-Zeichnungen gibt es in großer Vielfalt. Die hier gezeigten Beispiele sind alle auf einem Punktegitter aufgebaut. Während in den Bildern *a*, *b* und *c* die Punkte miteinander verbunden sind, werden sie in *d*, *e* und *f* durch Kurven umrundet. Die Bilder *c*, *e* und *f* bestehen jeweils aus einer einzigen geschlossenen Linie. *d* dagegen könnte zwar auch ohne abzusetzen gezeichnet werden, wird aber aus fünf Linien zusammengesetzt (Bild rechts unten). Man beachte die Symmetrien: bezüglich Spiegelung an einer horizontalen oder vertikalen Achse und bezüglich Rotation um 45 Grad *(c)*, 90 Grad *(d)* und 180 Grad *(e)*.

▷ Tamilen verbunden. Nicht umsonst ist »Kolam« der Titel einer internationalen wissenschaftlichen Zeitschrift, die sich mit der tamilischen Kultur beschäftigt.

In der Regel beginnt man eine Kolam-Figur mit einem Gitter von Punkten (Bilder oben und rechts). Diese liegen zumeist in den Ecken einer – gedachten – Überdeckung der Ebene mit gleichmäßigen Dreiecken, Quadraten oder Sechsecken, oder sie breiten sich strahlenförmig um einen Mittelpunkt aus. Die Figur selbst entsteht durch Verbinden oder Umfahren der Punkte, die damit für die Zeichnerin sowohl Orientierung als auch Einschränkung sind. Für einige Zeichnungen ist es sehr wichtig, dass sie aus einer einzigen in sich geschlossenen Linie bestehen (der »Schlange des Lebens«). Sie ist Symbol für den unendlichen Kreislauf der Geburt, der Fruchtbarkeit und des Todes, für Stetigkeit, Ganzheitlichkeit und Ewigkeit. Das gilt – mit Einschränkungen – auch für die Figuren, die aus wenigen ineinander verschlungenen, geschlossenen Linien zusammengesetzt sind.

Generell zeigen die Figuren einen bemerkenswerten Sinn für Symmetrie. Viele von ihnen sind spiegelbildlich symmetrisch um eine horizontale oder vertikale Bildachse, oder sie bleiben bei Drehung um gewisse Winkel unverändert.

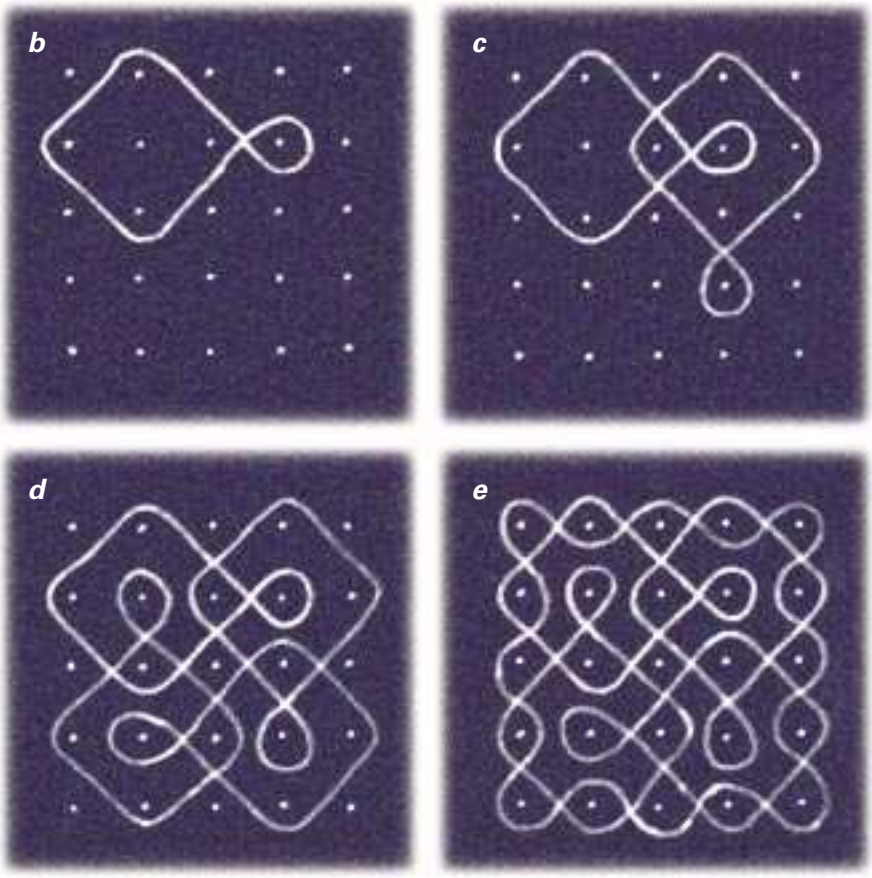
Einige Figuren bilden Familien, die sich durch gemeinsame Merkmale auszeichnen (Bild Seite 78). In manchen Fällen bestehen die größeren Figuren einer Familie aus mehreren Exemplaren eines kleineren Mitglieds derselben Familie. Gerade in diesen Familienstrukturen kommen in besonderem Maße mathematische Ideen zum Ausdruck.

Bildsprachen sind eine besondere Art …

Es ergibt sich, dass die theoretische Informatik ein geeignetes Mittel zur Beschreibung der *kolam* bereit hat: die so genannten Bildsprachen. Sie gehören zu den formalen Sprachen, deren wesentliches Kennzeichen es ist, dass es auf die Bedeutung der Zeichen der Sprache – zunächst – nicht ankommt. Eine formale Sprache ist definiert durch eine Menge abstrakter Symbole, das »Alphabet« der Sprache, sowie einen Satz von Regeln (die »Grammatik«), die beschreiben, wie man aus den Symbolen des Alphabets Ketten bilden darf. Die Theorie der formalen Sprachen nahm ihren Anfang vor etwa 45 Jahren mit den Untersuchungen des berühmten Linguisten Noam Chomsky über natürliche Sprachen. In den nachfolgenden Jahrzehnten wurde die Theorie zu einem wichtigen Hilfsmittel für die Analyse und Beschreibung von Programmiersprachen.

Bildsprachen sind formale Sprachen, deren Alphabet aus grafischen Symbolen, zum Beispiel kleinen Bildelementen, besteht und deren Grammatik vorschreibt, wie diese Symbole zu größeren Einheiten zusammenzusetzen sind. Sie eignen sich deshalb besonders zur Analyse und Beschreibung von bestimmten Bildern.

Der Erste, der sie auf Kolam-Muster anwandte, war Gift Siromoney (1932–1988), Chef der Statistik-Abteilung des Madras Christian College in Madras (heute Chennai), der Hauptstadt von Tamil Nadu. Siromoney verstand es, seine beruflichen Aktivitäten mit einem intensiven Engagement für die Umwelt, Geschichte und Kultur von Tamil Nadu zu verbinden: Ein 1989 erschienener, seinem



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON K. L. KAMAT

Häufig beginnt die Zeichnerin eine Kolam-Figur mit einem Punktegitter, das die endgültige Größe und Form grob vorgibt *(a)*. Um die Figur *d* aus dem Bild links zu zeichnen, wiederholt sie ein Grundelement viermal, wobei jedes Element um 90 Grad gegen seinen Vorgänger gedreht wird *(b, c, d)*. Zuletzt umrahmt sie die vier Elemente mit einer geschlossenen Kurve *(e)*.

Lebenswerk gewidmeter Gedenkband zählt über hundert Publikationen auf. Für ihn wie für seine Ehefrau und Kollegin Rani Siromoney, aber auch für andere Informatiker wie Kamala Krithivasan und K. G. Subramanian entpuppten sich die Kolam-Muster als ergiebiges Beispielmaterial für bereits definierte Bildsprachen und als Anregung zur Konzeption neuer Sprachen. Auch Informatiker außerhalb der in Madras tätigen Gruppe haben in dieser Richtung geforscht.

… von formalen Sprachen

Zur Einstimmung auf Bildsprachen möchte ich eine elementare formale Sprache einführen, die Symbolketten erzeugt; später sollen diese Symbolketten graphisch realisiert werden. Wir bezeichnen die Symbole unserer Sprache mit A, B, C und setzen fest, dass ABAA ein Wort der Sprache sein soll. Aus einem Wort der Sprache erzeugt man ein neues durch Anwendung der folgenden Regel:

$A \rightarrow B$, $B \rightarrow AC$, $C \rightarrow CC$

Angewandt auf das »Urwort« ABAA liefert diese Grammatik das Wort BACBB; daraus macht sie ACBCCACAC und daraus BCCACCCCCBCCBCC. Indem man die Ersetzungsregel hinreichend oft anwendet, entstehen Wörter beliebig großer Länge. Die einzelnen Teile der Ersetzungsregel sind nicht nacheinander, sondern stets gleichzeitig anzuwenden; so werden die Regeln $A \rightarrow B$ und $C \rightarrow CC$ auf jedes A bzw. C angewandt, das in dem zu verwandelnden Wort steht, nicht aber auf die As und Cs, die durch Anwendung der Regel $B \rightarrow AC$ aus dem zu verwandelnden Wort erst entstehen.

Formale Sprachen dieses Typs heißen Lindenmayer-Sprachen oder L-Sprachen nach dem Biologen Aristid Lindenmayer, der sie zur Modellierung von Pflanzenwachstum verwendet hat (Spektrum der Wissenschaft 2/2001, S. 58). Unsere Sprache ist eine kontextfreie, determi- ▷

nistische L-Sprache: kontextfrei, weil das Schicksal jedes Symbols beim Ersetzungsprozess von den benachbarten Symbolen unabhängig ist; deterministisch, weil – im Gegensatz zu natürlichen Sprachen – die Grammatik beim Ersetzen von Symbolen durch andere keine Freiheiten lässt: Aus einem bestimmten Wort kann nur ein eindeutig bestimmtes anderes Wort entstehen.

Grafische Interpretation: die Schildkröte

Wie macht man nun aus einer solchen Symbolkette ein Bild? Nach Przemsyslaw Prusinkiewicz, der für die Anwendung von L-Systemen auf Computergrafiken bekannt geworden ist, interpretiert man die Symbole als Befehle an eine gedachte Schildkröte *(turtle)*. Seymour Papert hat in den 1960er Jahren die »Schildkröten-Geometrie« *(turtle geometry)* ersonnen, um mithilfe des Computers die Vorstellungskraft von Kindern zu fördern.

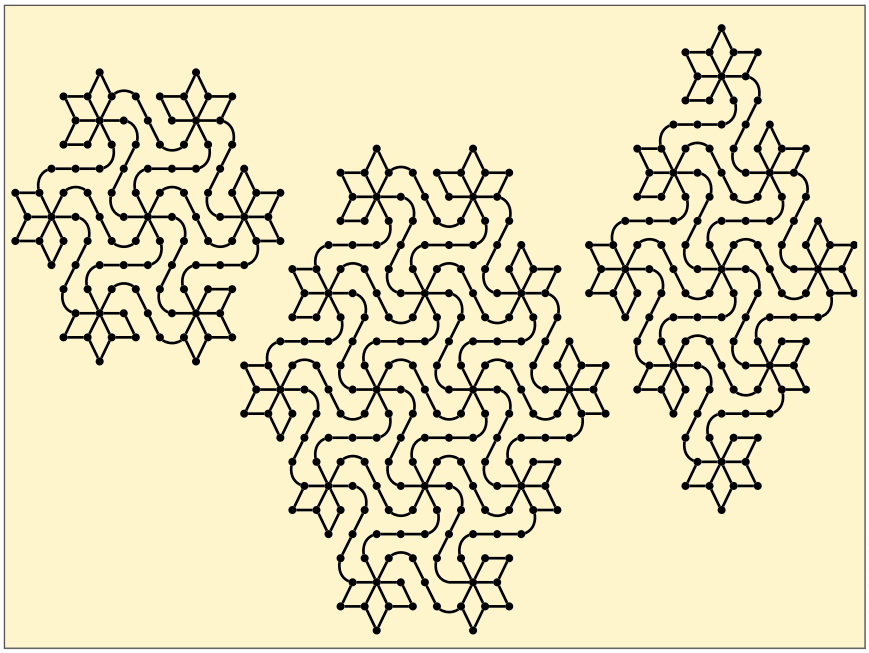
Paperts Schildkröte kriecht über das Papier und hinterlässt dabei mit ihrem dreckigen Schwanz eine Spur. Sie kann den Schwanz zwischendurch auch heben, wodurch die Linie unterbrochen wird. Die Schildkröte hat nur einen beschränkten Horizont, kann aber komplizierte Zeichnungen erzeugen, indem sie einige wenige Befehlen versteht und ausführt, darunter die folgenden:

F: Gehe einen Schritt voraus und zeichne dabei eine Linie.
f: Gehe einen Schritt (mit erhobenem Schwanz) voraus, ohne eine Linie zu zeichnen.
+: Wende dich um einen Winkel von *d* Grad nach links.
–: Wende dich um *d* Grad nach rechts.

Jeder Schritt hat die gleiche Länge und jede Drehung den gleichen Winkel *d*. Diese Werte sind vorab festzulegen, ebenso wie Anfangsposition und -orientierung. Dann kriecht die Schildkröte los, indem sie einen Befehl nach dem anderen ausführt.

Mit dieser Interpretation erzeugt eine kontextfreie, deterministische L-Sprache zum Beispiel eine bestimmte Familie von Kolam-Zeichnungen, die »Schlangen« (Kasten rechts). Wenn man die Schritte der Schildkröte bei jeder Iteration so verkleinert, dass die entstehende Zeichnung in ein Quadrat von gleichbleibender Größe passt, und diese Prozedur unendlich oft wiederholt, erhält man überraschenderweise ein Fraktal. Es handelt sich um eine Variante der berühmten flächenfüllenden, sich selbst nicht berührenden Peano-Kurve (Spektrum der Wissenschaft 3/1992, S. 72). Eine andere derartige Sprache erzeugt die *kolam*, die als »Krishnas Fußketten« bezeichnet werden. Weitere Familien von Zeichnungen lassen sich durch ähnliche Wachstumsvorschriften erzeugen.

Ihrem großen Erfolg zum Trotz fehlt den Bildsprachen ein wesentlicher Aspekt der Kolam-Figuren: Sie machen keinen Gebrauch von dem Punktgitter, dem »Skelett« der Zeichnung, das die Frauen von Tamil Nadu vorab auf dem Boden markieren und das endgültige Form und Größe des Werks erahnen lässt. Um diesem Mangel abzuhelfen, arbeiteten die Informatiker aus Madras mit so genannten Gittersprachen *(array languages)*. Dabei treten zweidimensionale Anordnungen von Symbolen an die Stelle der Symbolketten in den Bildsprachen.



AMERICAN SCIENTIST

Diese drei *kolam* gehören zur Familie der Parijatha-Ranken.

Gittersprachen

Ein Wort einer Gittersprache ist also gewissermaßen ein Rechteck aus Rechenkästchen, die mit Symbolen gefüllt sind. Wieder gibt es Ersetzungsregeln; allerdings schreiben diese vor, wie ein Teilrechteck durch ein anderes, im Allgemeinen größeres, Teilrechteck zu ersetzen ist. Damit ist die Freiheit, Ersetzungsregeln zu definieren, stark eingeschränkt; denn nach der Ersetzung müssen die neu entstandenen Teilrechtecke wieder so zusammenpassen wie zuvor.

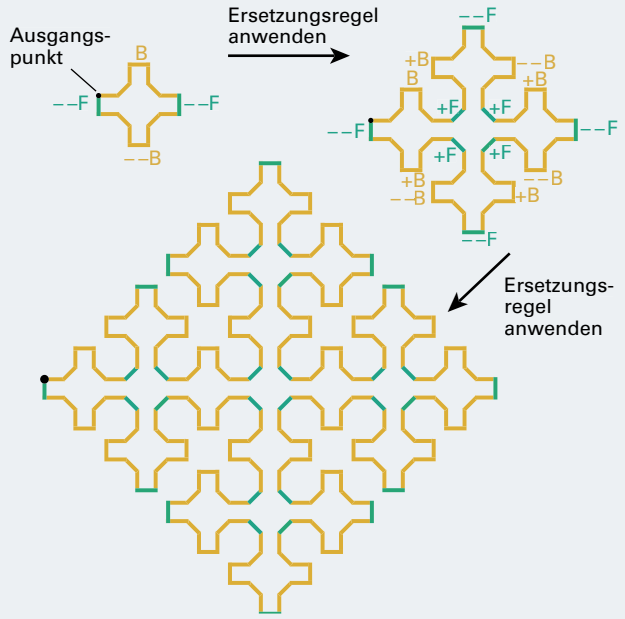
In den nach Siromoney benannten Matrix-Grammatiken beschränken sich die Ersetzungsregeln darauf, ein Teilrechteck durch zwei, drei oder mehr Exemplare seiner selbst, über- oder nebeneinander angeordnet und möglicherweise gespiegelt, zu ersetzen. In den so genannten Kolam-Gittergrammatiken dürfen nur Teilrechtecke ersetzt werden, die ein festgelegtes Verhältnis von Höhe zu Breite haben. Die Forschergruppe aus Madras hat umfangreiche theoretische Untersuchungen über Gittersprachen betrieben. Mit ihrer Hilfe gelingt es, die *kolam* aus der Familie der »Berggipfel« kompakt zu beschreiben (Kasten Seite 80). Im Gegensatz zu den durch Bildsprachen dargestellten Mustern wachsen die Berggipfel nicht in jedem Schritt auf ein Vielfaches ihrer Größe: Das Wachstum ist statt exponentiell nur polynomial.

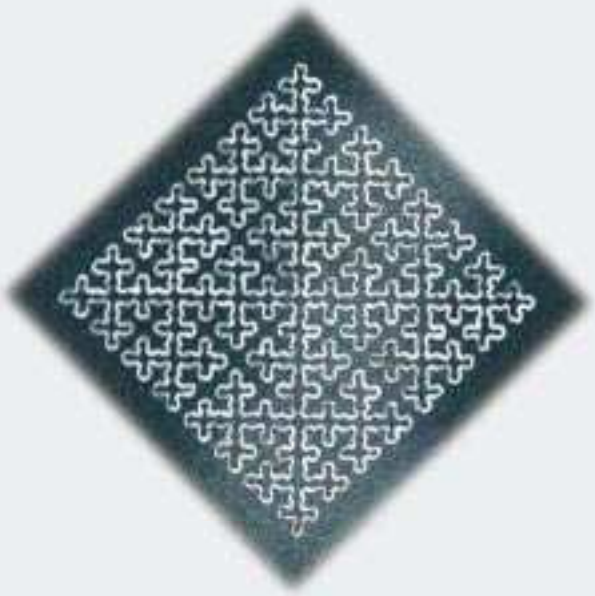
Wie bei den Bildsprachen gilt es, die Symbole in den Kästchen des Rechtecks grafisch zu interpretieren. Dafür hat die Gruppe in Madras zwei verschiedene Möglichkeiten erkundet. Entweder könnte jedes Symbol für ein grafisches Element stehen, das in das zugehörige Kästchen zu setzen ist. Die Gittersprache, vor allem die Ersetzungsregeln, ist dann so zu formulieren, dass die grafischen Elemente räumlich benachbarter Symbole stets bruchlos aneinander anschließen. Oder jedes Symbol entspricht einem Gitterpunkt in dem »Skelett« eines *kolam* und ▷

Kolam-Zeichnungen – durch formale Sprachen reproduziert

Kontextfreie, deterministische L-Sprachen erzeugen über die Interpretation der Symbole als Schildkröten-Befehle klassische Kolam-Zeichnungen.

Die Schlangen-Kolams (rechts) werden in einem Zug gezeichnet, und Anfang und Ende fallen zusammen. Im Gegensatz zu vielen anderen *kolam* wird kein Punktegitter vorgegeben.





Regeln

F: Gehe einen Schritt voraus und zeichne dabei eine Linie.
+: Wende dich um 45 Grad nach links.
–: Wende dich um 45 Grad nach rechts.
B: F+F+F––F––F+F+F

Ersetzungsregel:
B → B+F+BFB+F+B

Die kleinste Figur (oben) zeigt die Startsymbolkette (das »Urwort«) B––F––B––F. Durch Anwendung der Ersetzungsregel erhält man immer komplexere Versionen der Kolam-Schlange; so ergibt sich nach dem ersten Mal (B+F+B––F––B+F+B) ––F––(B+F+B––F––B+F+B)––F. Eine Anwendung der Ersetzungsregel ersetzt jeden der vier Arme eines Kreuzes durch ein komplettes Kreuz. Dadurch wächst die Figur exponentiell an: erst 4 Arme, dann 16, dann 64 und so weiter.

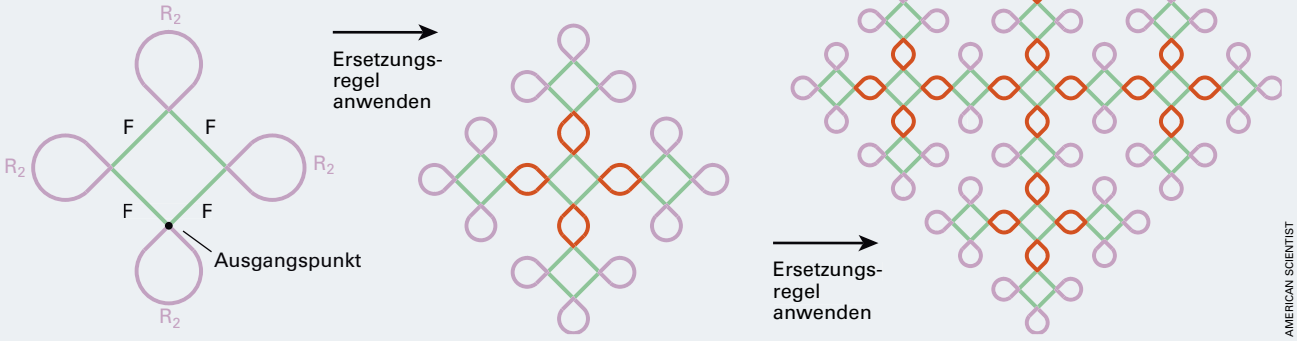
Die Schildkröten-Geometrie Seymour Paperts kennt keine gebogenen Linien und kann daher auch nur eckige Versionen der Schlangen-Kolams erzeugen. Man kann aber ohne weiteres Anweisungen definieren, die der Schildkröte einen Bogen zu laufen befehlen, so zum Beispiel für die Reproduktion von Krishnas Fußkette (unten).

Die Start-Symbolkette ist $R_2FR_2FR_2FR_2$. Die Ersetzungsregel macht aus jedem Blatt vier neue Blätter. Dabei wird ein äußeres Blatt (R_2) zu einem inneren (ein Paar von R_1) und drei äußeren. Ein inneres Blatt wächst zu zwei inneren und zwei senkrecht dazu stehenden äußeren heran.

Regeln

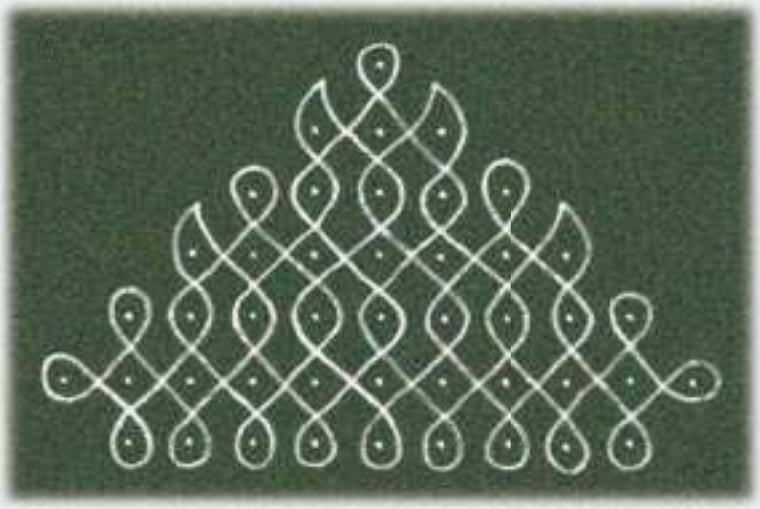
F: Gehe einen Schritt voran und zeichne eine Linie.
R_1: Gehe und zeichne eine Rechtskurve mit 90 Grad.
R_2: Gehe und zeichne eine Rechtsschleife von 270 Grad, die an deinem Ausgangspunkt endet.

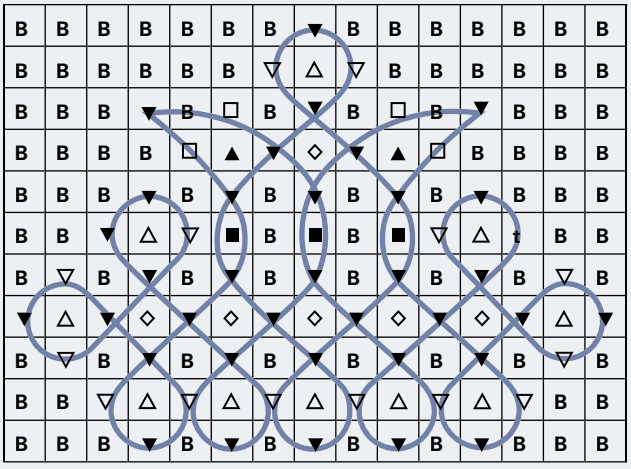
Ersetzungsregeln:
F → F
R_1 → $R_1FR_2FR_1$
R_2 → $R_1FR_2FR_2FR_2FR_1$

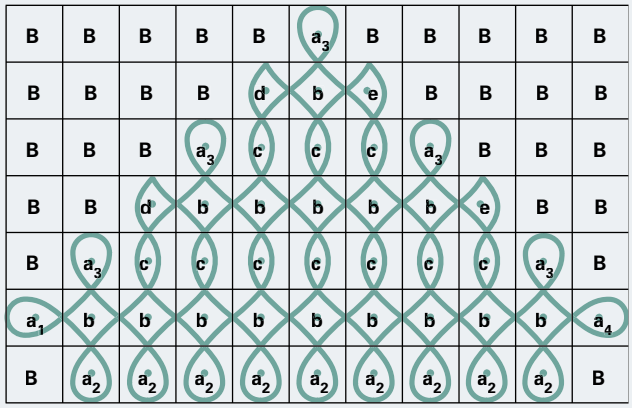


AMERICAN SCIENTIST

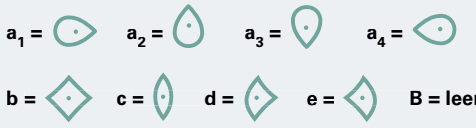
Erzeugung von Kolam-Zeichnungen durch Gittersprachen







AMERICAN SCIENTIST



Ein »Berggipfel«-Kolam (links oben) lässt sich durch Anwendung von Ersetzungsregeln in einer Gittersprache erzeugen. In dem so entstandenen Gitter ist jedes Symbol als ein bestimmtes Bildelement zu interpretieren (oben).

In einer anderen Gittersprache, die ebenfalls Berggipfel-Kolams erzeugt, geben die Symbole in den Gitterfeldern gleichsam Anweisungen, wie die Linie in ihrer Umgebung zu führen ist (links).

Regeln

1. Verbinde zwei ▽-Punkte mit einem Bogen durch einen ▼-Punkt um einen △-Punkt herum.
2. Verbinde zwei benachbarte ▼-Punkte durch gerade Linien (wodurch Rauten um ◇-Punkte entstehen).
3. Schließe einen ▼-Punkt durch zwei Bögen zwischen ■-Punkten ein.
4. Verbinde zwei ▼-Punkte mit einer Kurve durch einen □-Punkt.

▷ enthält Anweisungen, wie die Linie in der Umgebung dieses Punktes zu führen ist. Dies entspricht weitgehend der Arbeitsweise der Frauen aus Tamil Nadu.

Der algorithmische Charakter von Kolam

Mithilfe der Bildsprachen ist es den Informatikern gelungen, sowohl die Reichhaltigkeit der *kolam* aufzuzeigen als auch ihren algorithmischen Charakter, das heißt ihren Aufbau aus einzelnen, nach einer allgemeinen Vorschrift zusammenzufügenden Elementen. Das bedeutet nicht, dass die Frauen aus Tamil Nadu beim Zeichnen diese Algorithmen in irgendeinem Sinne anwenden würden. Gleichwohl belegt die algorithmische Darstellung, dass die *kolam* und insbesondere deren Familien mehr sind als nur eine Ansammlung irgendwelcher Zeichnungen. Ihnen allen gemein sind bestimmte systematische Prinzipien und Techniken. Damit hat eine reiche und hoch geschätzte kulturelle Tradition nun auch akademische Weihen erhalten: Was die Frauen von Tamil Nadu praktizieren, ist echte Mathematik.

Andererseits hat sich den Informatikern in Gestalt der *kolam* eine gänzlich unverhoffte Anwendung für ihre Arbeit aufgetan. Für einen Wissenschaftler, der tagaus, tagein nichts weiter studiert als selbst definierte theoretische Konstrukte, ist es etwas vom Schönsten und ein Beweis für die Sinnhaftigkeit seines Tuns, wenn er diese Strukturen in der Realität, weitab von den Wurzeln seiner eigenen Wissenschaft, vorfindet. Darüber hinaus konnten in diesem Fall die Wissenschaftler sogar etwas für ihre eigene Tätigkeit von den Praktikerinnen lernen – ein ungewöhnliches Beispiel für eine interdisziplinäre Zusammenarbeit. ◁

Marcia Ascher ist emeritierte Professorin für Mathematik am Ithaca College in Ithaca (New York). Seit ihrem Studium an der Universität von Kalifornien in Los Angeles interessiert sie sich für nicht-klassische Formen der Mathematik.

© American Scientist Magazine (siehe www.americanscientist.org)

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE

Ethnomathematik. Von Paulus Gerdes. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1997.

Ethnomathematics: A Multicultural View of Mathematical Ideas. Von Marcia Ascher. Chapman & Hall / CRC, New York 1994.

Shastric Traditions in Indian Arts. Von A. L. Dallapiccola et al. (Hg.). Steiner, Stuttgart 1989.

A Perspective in Theoretical Computer Science: Commemorative Volume for Gift Siromoney. Von R. Narasimhan (Hg.). World Scientific, 1989.

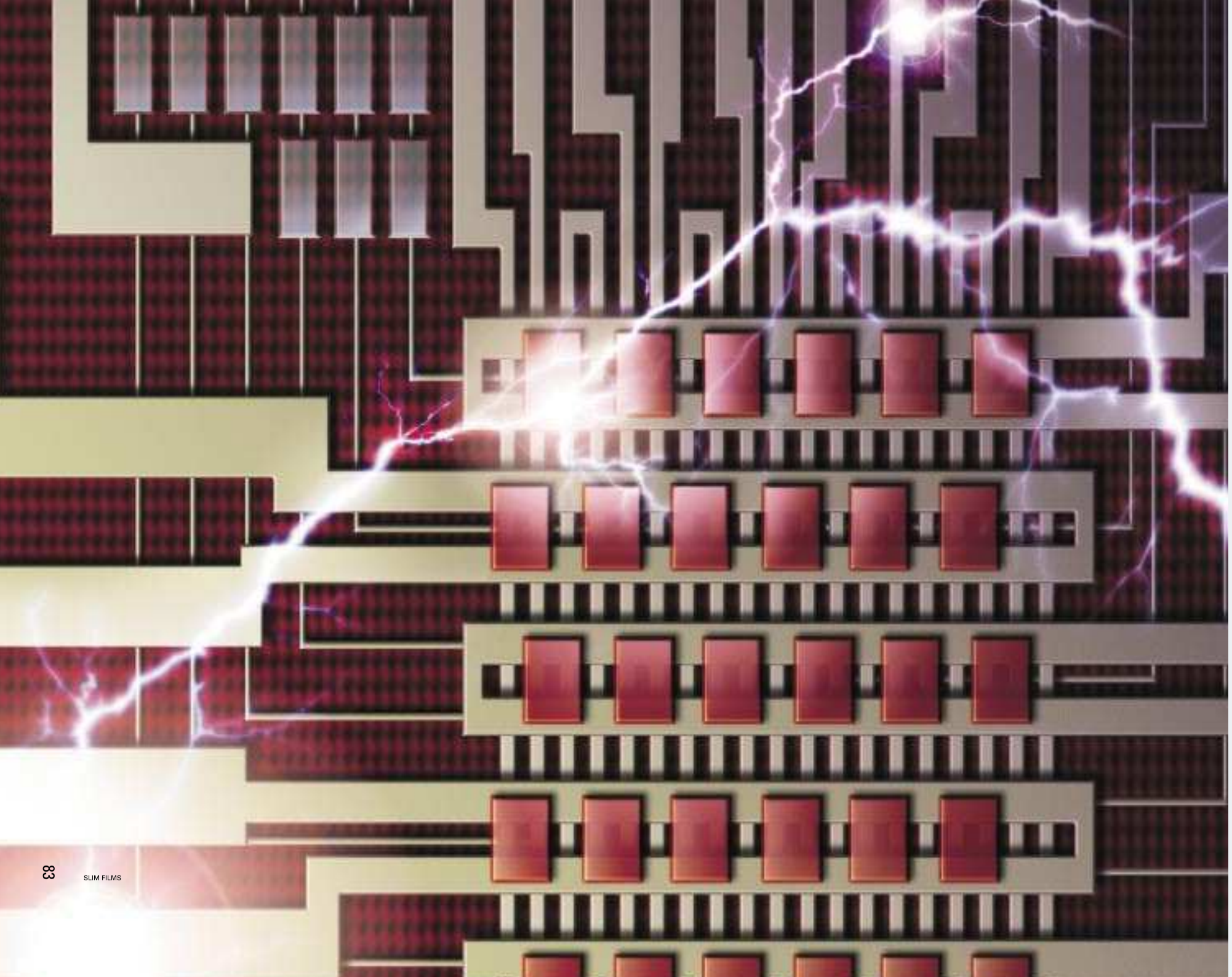
Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Blitzableiter für Mikrochips

Je kleiner die elektronischen Schaltkreise, desto bedrohlicher sind die Folgen selbst geringster Entladungen. Jede neue Generation von Chips erfordert deshalb neue Schutzmaßnahmen.

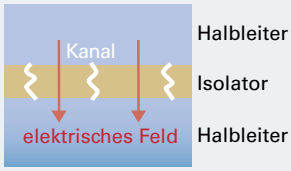
Von Steven H. Voldman

Elektrostatische Aufladung ist ein alltägliches Phänomen: Wer mit Turnschuhen über einen Wollteppich geht, kann leicht mehr als 5000 Volt erzeugen, die er beim Berühren von Metall als kurzen »Schlag« zu spüren bekommt. Was für den Menschen nur unangenehm ist, kann mikroelektronische Bauteile durchaus schon schädigen. Spezielle Schaltungen schützen deshalb Mikrochips gegen elektrostatische ▷

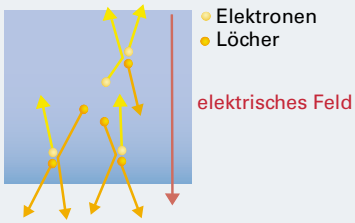


Halbleiter unter hoher Spannung

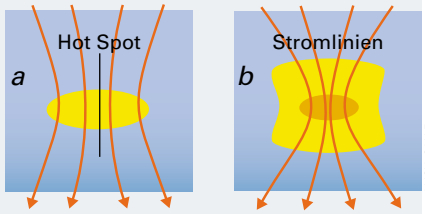
Dielektrischer Durchbruch
Dünne Isolationsschichten in Halbleiterstrukuren sind gefährdet: Ein starkes elektrisches Feld erzeugt Ketten molekularer Defekte, die blitzartig den Isolator durchkreuzen. Die Defekte bleiben als Pinhole genannte Kanäle oder Poren zurück.



Lawinenartiges Stromwachstum
Dieser Effekt tritt auf, wenn ein starkes elektrisches Feld in einem Halbleiter Elektronen und Löcher auf so hohe Energie beschleunigt, dass sie weitere Ladungsträger freischlagen können. Das Feld beschleunigt auch diese wieder und der Strom wächst kaskadenartig immer weiter an.

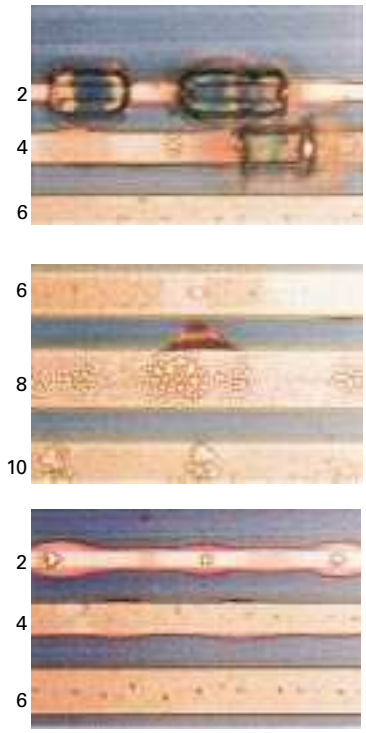


Stromeinschnürung
Der Widerstand in einem Halbleiter fällt mit zunehmender Temperatur, sodass der Stromfluss in einem »Hot Spot« lokal anwachsen kann *(a)*. Der sich verengende Strom verstärkt die Aufheizung, was den Strom weiter konzentriert *(b)*.



ALICIA CALLE

▷ Entladung (ESD, *electrostatic discharge*). Doch je kleiner die Strukturen dieser Bauelemente werden, desto leichter versagen bewährte Verfahren. Experten befürchten sogar, dass nicht Quantenphänomene dereinst dem Schrumpfen der Schaltungen ein Ende setzen (siehe SdW-Spezial 2/2001, S. 40), sondern nicht mehr beherrschbare Entladeströme.



STEVEN H. VOLDMAN

Die größten Schäden richtet die damit einhergehende Erwärmung an. So kann sich die Dotierung ändern: Jedes mikroelektronische Bauelement entsteht aus einem Halbleiterkristall durch den Zusatz von Fremdatomen (Dotierung), die seine elektrischen Eigenschaften modifizieren. Energiezufuhr kann diese Atome aber von ihren Plätzen lösen und wandern lassen – dabei geht dann die gewünschte Funktion des veränderten Kristalls verloren.

Weit dramatischer noch wirkt der »thermische Durchbruch«: Wenn ein Entladestrom den Halbleiter lokal ausreichend aufheizt, sinkt an diesem »Hot Spot« der elektrische Widerstand. In der Folge fließt noch mehr Strom dort hindurch und der Prozess schaukelt sich auf. 1500 Grad Celsius und mehr sind möglich und die typischen Chip-Werkstoffe Silizium, Aluminium und Kupfer können schmelzen.

Kupfer hat einen höheren Schmelzpunkt als Aluminium und eignet sich deshalb besser für elekrische Leitungen zwischen Chips. Eine Tantal-Hülle gibt weiteren Schutz. Wird dieser »Draht« durch eine Entladung erhitzt, kann die Isolatorschicht reißen (oben; Leitungsbreiten in Mikrometer); ist keine vorhanden, wirft das Kupfer Blasen oder verdampft (Mitte). Bei Temperaturen von 3000 Grad Celsius kann das Kupfer in benachbarte Regionen austreten (unten).

Deshalb versuchen die Konstrukteure beim Schaltkreisentwurf die Geometrie ihrer Bausteine so großzügig zu gestalten, dass jeder Strom möglichst gleichmäßig hindurch fließt. Die verwendeten Materialien sollten Wärme gut ableiten, damit sich ein Bauteil nicht zu sehr aufheizt.

Generationswechsel fördert Übersprechen

Ähnliche Überlegungen gelten für die elektrischen Verbindungen eines Schaltkreises, seien es horizontale Leiterbahnen, seien es Vias genannte vertikale Verbindungen zwischen verschiedenen Ebenen oder die Kontaktstellen eines Chips nach außen. Auch diese Leitungen müssen mehr und mehr schrumpfen, denn kurze Wege erhöhen die Geschwindigkeit, mit der Signale zwischen den funktionellen Einheiten der Schaltkreise ausgetauscht werden können. Wenn sich Hot Spots bilden, ist das bewährte Aluminium problematisch, denn es schmilzt bereits bei 660 Grad Celsius. Doch seit 1997 setzen sich Kupfer-Schaltverbindungen durch, da ihre höhere elektrische Leitfähigkeit kleinere und schnellere Schaltungen ermöglicht. Das verbessert den ESD-Schutz – Kupfer schmilzt erst bei 1083 Grad Celsius.

Weniger positiv wirkte ein Generationswechsel bei der Isolation leitender Verbindungen. Das übliche Siliziumdioxid wird bei hohen Frequenzen zu durchlässig und die Gefahr eines »Übersprechens« wächst. Der Grund: Zwei elektrische Leiter bilden mit einem dazwischen liegenden Isolator ungewollt einen Kondensator. Einen Gleichstrom würde solch ein Bauelement unterbrechen: Es wird aufgeladen, danach fließt bis zur Entladung kein Strom mehr. Diesen Effekt bezeichnet man als kapazitiven Widerstand. Doch bei Wechselstrom lässt er nach, und zwar proportional zu dessen Frequenz und zu der so genannten Dielektrizitätskonstanten k der Isolation. Aus diesem Grund kommen bei Hochfrequenzchips Low-k-Materialien zum Einsatz. Diese leiten Wärme jedoch schlechter als das klassische Siliziumdioxid. Breitere Leitungen und andere Tricks kompensieren das zum Teil wieder, sodass der Vorteil des neuen Leitungsmaterials Kupfer überwiegt. Insgesamt wurde also die Widerstandsfähigkeit der elektrischen Verbindungen gegen ESD verbessert. Anders wären Schaltungen für Signale von mehreren Gigahertz (Milliarden Hertz) gar nicht möglich gewesen.

Doch wie sieht es mit den Halbleiterelementen der Schaltungen selbst aus, insbesondere den Arbeitspferden der Mikroelektronik, den Transistoren. John Bardeen, Walter H. Brattain und William Bradford Shockley hatten dieses heute so unentbehrliche Bauelement im Dezember 1947 erfunden; sie erhielten dafür 1956 den Nobelpreis in Physik (Spektrum der Wissenschaft 3/1998, S. 80). Mit kleiner elektrischer Leistung steuern Transistoren eine große Leistung; das jeweilige Verhältnis wird dann als Verstärkung bezeichnet.

Die erste Blüte erlebte diese Technik mit den Bipolar-Transistoren, die aus einem Sandwich unterschiedlich dotierter Halbleiterregionen bestehen. Ein kleiner Strom durch die Basis genannte mittlere steuert den Stromfluss zwischen den beiden äußeren Regionen (Emitter und Kollektor). In der Digitaltechnik, beispielsweise bei Computerkomponenten, beherrschen die jüngeren MOSFETs die Szene (Metalloxid-Halbleiter-Feldeffekttransistoren). Emitter und Kollektor werden dort zu Source und Drain (englisch für »Quelle« und »Senke«), dazwischen liegt der Channel (siehe Kasten nächste Seite). Auf diesem liegt, durch eine Schicht Siliziumdioxid elektrisch isoliert, eine Elektrode aus metallischem Polysilizium auf, das Gate. Legt man daran eine Steuerspannung, zieht ein elektrisches Feld Elektronen in den Kanal, sodass ein Nutzstrom fließen kann.

Mit den jüngsten Generationen dieser Bausteine hat das Zeitalter der Nanostruktur begonnen. Beispielsweise verkündete Intel, Chips mit 50 Nanometern langen Channels und 1,2 Nanometern dicken Gate-Oxiden herzustellen – eine aus nur fünf Atomen bestehende Schicht. Den ESD-Schutz stellt das allerdings vor massive Probleme, denn je dünner das Dielektrikum, desto kleinere Entladespannungen richten bereits Schäden an, es bedarf nicht einmal mehr der Aufheizung. Als »dielektrischen Durchbruch« bezeichnen Fachleute den verheerenden Effekt von Ladungsträgern, die wie ein Blitzstrahl den Isolator durchschlagen und molekulare Bindungen zerbrechen. Dabei entstehen regelrechte Löcher im ▷

Wenn Masken Funken sprühen

Fotolithografische Masken definieren, welche Stoffe sich wo in einem mikroelektronischen Baustein bei der Fertigung abscheiden oder abgetragen werden. Der Miniaturisierung der Schaltungen entspricht auch eine zunehmende Verfeinerung dieser Masken. Obwohl sie keine elektrische Funktion haben, kann elektrostatische Entladung auch hier schwere Schäden anrichten.

Julian Montoya von Intel und Arnold Steinman von Ion Systems in Berkeley (Kalifornien) haben jüngst bewiesen, dass sich Maskenstrukturen aufladen und dann auf angrenzende Bereiche entladen können. Riskant sind vor allem Schäden an sehr feinen Strukturen, da geringe Spannungen dafür ausreichen, Sichtkontrollen aber diese Fehler oft nicht entdecken und die schadhaften Masken dann in der Produktion verwendet werden. Vermutlich können Materialien, die Ladungen schnell ableiten, dem ebenso abhelfen wie bessere Inspektionsverfahren, doch diese Werkstoffe stehen hier noch am Anfang.

JAMES WILEY KLA-TENCOR CORPORATION

Elektrostatische Entladung zerstörte das Chromoxid dieser Strukturen einer Fotomaske und unterbrach damit die Fertigung bei einem bedeutenden europäischen Halbleiter-Hersteller.

▷ Oxid der Gate-Elektrode. Erreicht die Entladung hingegen die Senke, verstärkt sie dort das elektrische Feld. Das beschleunigt Leitungselektronen, die nun noch gebundene Elektronen freischlagen können – der Stromdurchfluss wächst lawinenartig bis zum thermischen Durchbruch.

Gefahr erkannt und sofort gebannt

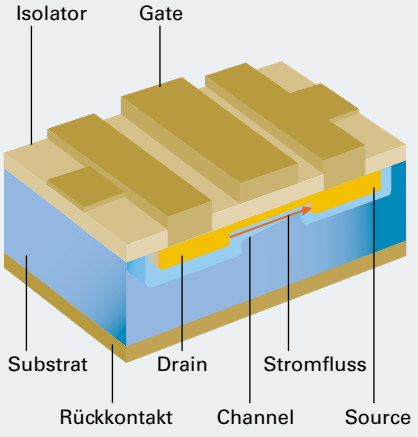
Als gebräuchlichste Gegenmaßnahme werden Schutzschaltungen auf dem Chip integriert, die Entladungen ableiten. In den 1960er und 1970er Jahren waren das beispielsweise Dioden, seit den 1980er und 1990er Jahren spezielle MOSFETs mit einer großflächigen Drain und entsprechend geringer Gefahr, Ströme zu konzentrieren. Allerdings entstehen dabei Kapazitäten, die die Leistungsfähigkeit eines Mikrochips mindern, und es ist keine leichte Aufgabe, eine solche Konstruktion zu optimieren. Eine wenig gebräuchliche Alternative nutzt den Umstand, dass zwischen der Senke eines MOSFET und dem Substrat aufgrund der Dotierung ungewollt eine Gleichrichter-Struktur (Diode) entsteht, die als ESD-Schaltung fungieren kann.

Seit etwa 1995, als die Leitungen schmaler als 250 Nanometer wurden, kommen auch als Power Rail Clamps bezeichnete Schaltungen zum Einsatz. Sie sollen einen ESD-Impuls anhand seines Frequenzspektrums oder anhand der Überspannung erkennen und ableiten. Solche Systeme wurden erst durch die modernen Hochgeschwindigkeits-Transistoren möglich, denn ESD-Impulse haben oft Frequenzanteile von bis zu einem Gigahertz, erfordern also ein sehr schnelles Schalten der Schutzstrukturen. Heutzutage sind beispielsweise Mikroprozessoren und Funkfrequenz-Chips durch solche Power Rail Clamps geschützt. Mit jeder neuen Generation von Schaltkreisen wird ihre Konstruktion aber schwieriger: Sie müssen ebenfalls schrumpfen, gleichzeitig aber noch besser sein. Zudem ändern neue Technologien die Rahmenbedingungen.

Dazu gehört die so genannte Silizium-auf-Isolator-Bauweise (*Silicon-on-Insulator*, SOI), eine Variante der CMOS-Technik. Sie ermöglicht schnellere Schaltungen, denn eine dünne Oxidschicht isoliert die Transistoren vom dickeren Siliziumsubstrat und reduziert dadurch unerwünschte Kapazitäten. Dieser Isolationsfilm bedeutet aber, dass die erwähnte Diodenstruktur in der Vertikalen nicht mehr entsteht. Vor wenigen Jahren wurde das Problem gelöst, indem die Konstrukteure entsprechend dotierte Gebiete in der Ebene aneinander grenzen ließen. Es entstanden also horizontale Dioden, die Überspannungen wieder ableiten konnten. Diese Technik wird noch für Bausteine ausreichen, in denen die Siliziumschicht gerade mal zwanzig Nanometer dünn ist.

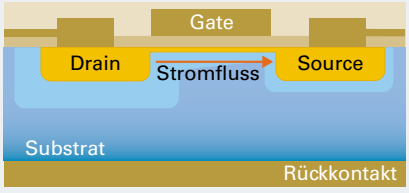
CMOS-Systeme eignen sich gut für digitale Anwendungen: Strom fließt nur in einem Inverter genannten Element und nur während des Umschaltens von einer logischen »Eins« zur »Null« und umgekehrt. Dabei müssen aber auch die Kapazitäten der Leitungen umgeladen werden. CMOS-Inverter eignen sich deshalb weniger gut für Hochgeschwindigkeits-Chips etwa für den Einsatz in Handys und Computern mit mobilem Internetzugang. Dieser Markt wird im nächs-

Risiko thermischer Durchbruch

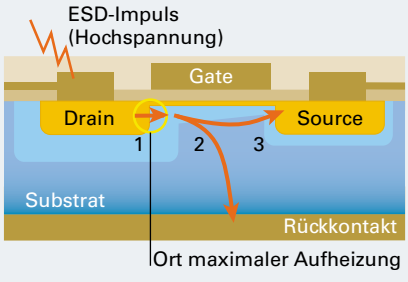


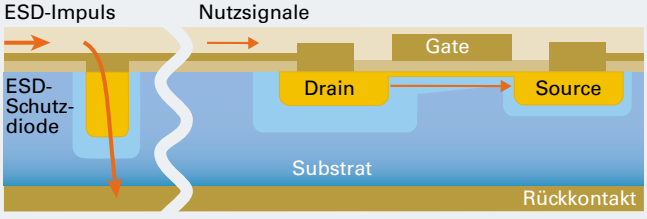
Im normalen Betrieb eines Transistors vom MOSFET-Typus (links) fließt Strom durch einen dünnen Kanal zwischen den als Drain und Source bezeichneten Regionen (rechts oben). Eine zwischen Gate-Elektrode und Substrat angelegte Spannung schaltet diesen Strom ein und aus.

Wenn der Puls einer elektrostatischen Entladung den Drain erreicht (rechts unten), wächst der Strom lawinenartig (1). Es bildet sich ein direkter Fluss von Ladungsträgern durch das Substrat zum Rückkontakt (2). Dadurch ändert sich aber die Spannung im Substrat, bis der Transistor sozusagen umschaltet und Strom zurück zur Source fließt (3). Meist erhitzt sich vor allem der Übergang von Drain zu Channel.



ALICIA CALLE





ESD-Schutzschaltungen müssen einen Entladungspuls ableiten, bevor er die Transistoren auf einem Chip erreicht. Sie dürfen aber den normalen Strom von Datensignalen nicht stören.

ten Jahrzehnt aber weiterhin schnell wachsen, und die Frequenzen steigen dann von zehn auf hundert Gigahertz. Eine als Hochfrequenz-CMOS bezeichnete Technologie schafft noch die zehn Gigahertz, doch für höhere Frequenzen sind vermutlich Alternativen gefragt.

Der Vorgänger des MOSFET, der Bipolartransistor, erfährt deshalb zurzeit eine Renaissance, allerdings mit Silizium-Germanium (SiGe) und Galliumarsenid (GaAs) als zusätzlichen Werkstoffen. Sein Funktionsprinzip bleibt das schon genannte: Strom, der zwischen Emitter und Kollektor fließt, wird durch einen kleinen Strom gesteuert, der in eine als Basis bezeichnete Region eintritt.

Der Trick ist nun, schnellere Halbleiter wie Germanium mit dem Silizium zu kombinieren. Diese unterscheiden sich durch die Konfiguration ihrer Elektronen: Es kostet wesentlich weniger Energie, sie aus einem gebundenen Zustand zu lösen und als Leitungselektronen freizusetzen. Durch Zugabe von Germanium in die Basis eines Bipolartransistors lässt der sich um den Faktor hundert beschleunigen. Aufgrund der Regionen mit unterschiedlichen Energielücken spricht man von Heteroübergängen. Dem deutschen Forscher Herbert Kroemer von der University of California, Santa Barbara, wurde für seinen Beitrag zur Entwicklung solcher Bauelemente der Nobelpreis für Physik des Jahres 2000 zuerkannt. Silizium-Germanium-Transistoren werden bereits in extrem schnellen Oszilloskopen, Handys, Ortungssystemen (GPS) und in der Hochgeschwindigkeitskommunikation verwendet.

Letzte Lösung: Outsourcing

Man kann die Vorteile beider Techniken kombinieren und SiGe-Transistoren in eine Standard-CMOS-Technologie einbauen. Dann lassen sich Dioden und Transistoren anlegen, die keine andere Aufgabe haben, als elektrostatische Entladungen abzuleiten. Bis hundert Gigahertz hat das im Labor bereits funktioniert und IBM kündigte die kommerzielle Herstellung an. Doch bei der nächsten Leistungssteigerung dürften, da sind sich die Experten einig, wieder neue Konzepte für den ESD-Schutz erforderlich sein.

Heteroübergänge bietet auch Galliumarsenid (GaAs), dessen Elektronen beweglicher als die in Silizium sind. Kommerziell wird es in den Leistungsverstärkern von Mobiltelefonen und den optischen Schaltverbindungen verwendet, die elektronische Schaltungen mit Glasfaseroptik verbinden. Außerdem eignet sich GaAs für Raumfahrt-Anwendungen wie etwa Satelliten und interplanetare Sonden. Standard-CMOS-Bausteine lassen sich daraus aber nur schwer herstellen, denn es gibt kein dem Siliziumdioxid vergleichbares, als Isolator fungierendes Oxid von GaAs. Dieser Nachteil vereitelt aber auch die bislang beschriebenen ESD-Schutzmaßnahmen. Folglich sind GaAs-Bausteine empfindlicher gegenüber Entladung. Das ist gerade in der Raumfahrt-Elektronik fatal, sind die Flugkörper doch oft einem erheblichen Beschuss durch geladene Partikel ausgesetzt.

Vor fast einem Jahrzehnt entwickelte Karlheinz Bock, damals an der Universität Hannover, so genannte Feldemissionsschutzstrukturen beziehungsweise Funkenstrecken. Das sind konisch in den Halbleiter geätzte Vertiefungen mit einem winzigen Luftspalt zwischen der Spitze des Konus und einer Leiterbahn des Bausteins. Eine Spannung aus einer Entladung erzeugt an dieser Spitze ein sehr hohes elektrisches Feld und die Spannung entlädt sich über den Spalt. Solche Strukturen haben gegenüber speziellen Dioden oder Transistoren eine Reihe theoretischer Vorteile: Dank einer geringeren Kapazität stören sie den zu schützenden Baustein weniger und sie können hohe Ströme entladen. Allerdings brennen auch diese Wunderwaffen gelegentlich durch, sodass ihre Zukunft in den Sternen steht. Eine Zuflucht bleibt den Entwicklern aber immer: Wenn alles andere versagt, halten teure Schutzschaltungen außerhalb des Chips ESD-Impulse fern. ◁

Gefahr für Datenspeicher

Schreib-Lese-Köpfe für Festplatten und Disketten verwenden Magnetowiderstandselemente, um Information zu speichern beziehungsweise zu lesen. Die auf Magnetfelder reagierende Komponente besteht aus einem dünnen Film eines »magnetoresistiven« Materials: Wenn der Kopf über die Platte fegt, verändern Schwankungen im magnetischen Feld den elektrischen Widerstand in diesem Film. Dadurch wird die Magnetfeldänderung in elektrische Spannung übersetzt. Je schmaler der Streifen des magnetoresistiven Werkstoffs, desto höher die Informationsdichte der Fläche.

Elektrostatische Entladungen bedrohen auch hier die Funktion. So können sie den empfindlichen Film aufschmelzen. Der Strom aus einer Entladung kann aber selbst ein magnetisches Feld erzeugen, das die aufgezeichneten Daten verändert. Darüber hinaus haben winzige Blasen, die aufgrund der Hitze entstanden, schon manchen Lesekopf zum Crash gebracht.

Sicherungen mit niedrigem elektrischem Widerstand schützen Schreib-Lese-Köpfe mittlerweile während der Herstellung – im Notfall leiten sie schädlichen Strom ab. Es gibt auch Leitungen, die alle zum Kopf führenden Drähte kurzschließen, sodass während der Montage von Plattenlaufwerken kein Ausfall eintritt; sie werden danach wieder entfernt. Neuerdings setzt man die magnetischen Elemente auf Silizium-Wafer, um Schutzschaltungen zu integrieren.

Dennoch: Bislang gehören diese Schreib-Lese-Köpfe zu den gegenüber ESD empfindlichsten Komponenten. Schon Entladungen von 35 Volt reichen heute aus. Bei der nächsten Generation werden bereits 10 Volt Schaden anrichten, denn sie nutzt einen Tunneleffekt zwischen extrem dünnen Magnetfolien.

Der Ingenieur **Steven H. Voldman** forscht über elektrostatische Entladung (ESD) beim Silizium-Germanium-Entwicklungsteam am IBM Communication Research and Development Center in Burlington (Vermont). Zuvor hatte er am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (Massachusetts) ESD-Schaltungen für Mikroprozessoren und andere Halbleiterchip-Anwendungen entwickelt. Voldman hält etwa hundert US-Patente zum Thema.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

ESD in Silicon Integrated Circuits. Von Ajith Ameraskara und Chervaka Duvvury. John Wiley & Sons, 2. Auflage, 2002.

Investigating a New Generation of ESD-Induced Reticle Effects. Von James Wiley and Arnold Steinman in: Micro, Bd. 17; April 1999, S. 35. Online verfügbar siehe unten.

Basic ESD- and I/O Design. Von Sanjay Dabral und Timothy J. Maloney. John Wiley & Sons, 1998.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

EVOLOGICS GMBH

Von Flipper lernen

Bioniker entwickeln eine drahtlose Unterwasserkommunikation nach biologischem Vorbild.

Müssen Objekte im Meer geortet und vermessen werden, etwa im Rahmen der Überwachung von Pipelines, der Inspektion havarierter Tanker oder auch bei der Erforschung des Meeresbodens, so setzt man Sonden aus, die Ultraschallsignale senden beziehungsweise deren Reflexionen empfangen. Kabel übertragen die Daten zum Schiff. Für den Einsatz im Meerwasser brauchen diese Leitungen aber eine gegen Korrosion resistente Mantelung, die je nach Länge enorm zu Buche schlagen kann. Zudem können sich Kabel an Felsen, Korallen oder anderen Hindernissen verfangen – im schlimmsten Fall geht die Sonde verloren.

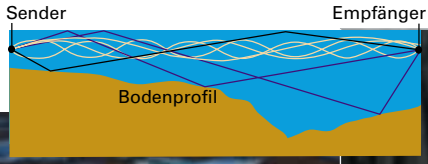
Eine drahtlose Kommunikation wäre deshalb sehr wünschenswert, doch elektromagnetische Wellen werden im Meerwasser stark absorbiert – Funk- und Lichtsignale kommen deshalb nicht weit. Meeressäuger haben dieses Problem bekanntlich gelöst: Sie singen. Denn mit Schallwellen lassen sich größere Distanzen überbrücken. Die großen Wale nutzen Infraschall, dessen Frequenzen unterhalb unserer Hörschwelle liegen, um über Hunderte von Kilometern Kontakt zu halten. Delfine kommunizieren hingegen in einem Frequenzbereich von sieben bis 200 Kilohertz, also überwiegend mit Ultraschall (die menschliche Hörschwelle liegt bei maximal zwanzig Kilohertz). Der reicht nur wenige Kilometer weit, kann aber mehr Information transportieren. Die Schallgeschwindigkeit im Wasser beträgt zudem etwa 1500 Meter pro Sekunde, fünfmal so viel wie in der Luft.

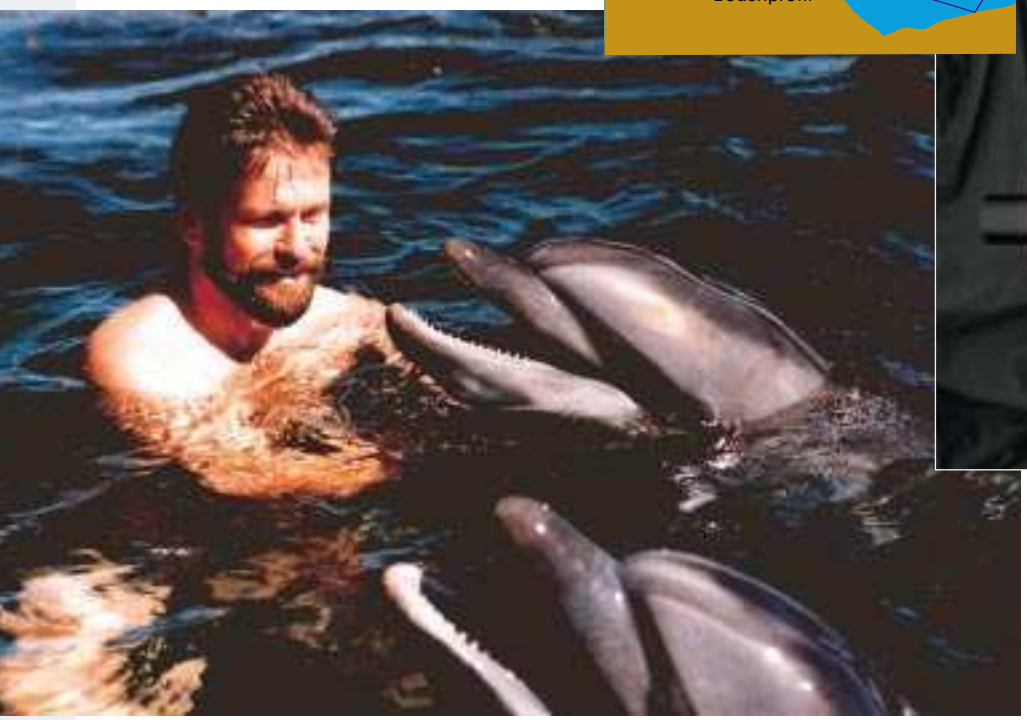
Allerdings ist die Übertragung von Daten auf akustischem Wege unter Wasser nicht so einfach. Denn das Medium ist nicht homogen und ständig in Bewegung, Tiere und Schiffe steuern ihrerseits Laute und Geräusche hinzu, kurz: Das Rauschen ist erheblich. Das größere Problem aber ist die so genannte Mehrwegeausbreitung: Die Signale werden an Schichten mit unterschiedlicher Temperatur und verschiedenem Salzgehalt gebeugt, von der Meeresoberfläche, vom Meeresboden und Hindernissen vielfach reflektiert. Je nach Weglänge treffen Echos und direkt durchlaufende Signale zeitlich versetzt beim Empfänger ein und überlagern sich dort. Verzerrungen und komplizierte Nachhalleffekte sind die Folge. Die Struktur dieser Mehrwegeausbreitung verändert sich obendrein fortlaufend.

Wenn Sonden unter Wasser singen

Dagegen helfen elektronische Schaltungen, die das Frequenzspektrum eines Signals nach bestimmten Gesichtspunkten optimieren. Allerdings können sie den rasch wechselnden Übertragungsverhältnissen nicht immer Rechnung tragen. Auch im militärischen Bereich wird das *frequency hopping* eingesetzt, bei dem die Signale nicht kontinuierlich auf einer festen Trägerfrequenz, sondern als Folge

Ein Schallsignal breitet sich unter Wasser nicht nur geradlinig aus, sondern kann vielfach reflektiert und gebeugt werden (Grafik rechts). Überlagern sich die verschiedenen Kopien dann im Empfänger, können diese einander auslöschen (destruktive Interferenz).



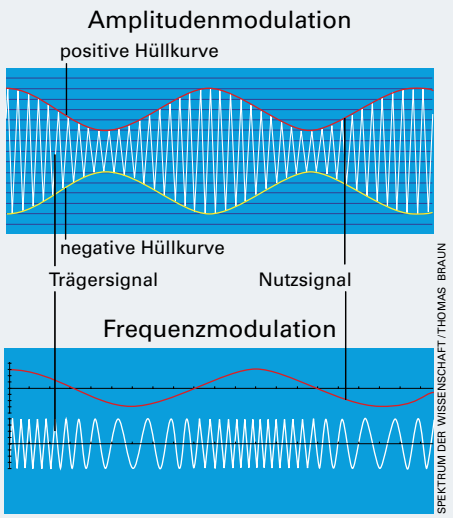


GRAFIK: THOMAS BRAUN /VORLAGE EVOLOGICS, FOTOS: EVOLOGICS

Zwitschernd verständigen sich Delfine im Meer über Kilometer hinweg. Die Firmengründer von EvoLogics – im Bild Rudolf Bannasch mit einigen »Mitarbeitern« – analysierten diese Form der Signalübertragung und entwickelten ein entsprechendes Modem (oben).

Codierung von Signalen

Um ein Nutzsignal an einen Empfänger zu senden, wird es heute üblicherweise einem Trägersignal aufgeprägt. Im einfachsten Falle handelt es sich um eine Amplitudenmodulation: Der Absolutwert des Trägersignals variiert mit der Amplitude der zu übertragenden Information. Komplexer, aber viel weniger störanfällig etwa gegen atmosphärische Entladungen ist die Frequenzmodulation, bei der eine hochfrequente Trägerwelle durch die Signalfrequenz moduliert wird (siehe Abbildung).



von kurzen Pulsen auf ständig wechselnden Frequenzen gesendet werden. Das verringert den störenden Einfluss der Echos: Wenn eine reflektierte Schallwelle mit einem direkt durchlaufenden Signal am Empfänger eintrifft, hat Letzteres eine andere Frequenz, und die Interferenz bleibt aus. Leider können kurze Pulse leicht absorbiert werden, sodass dann im Signal einzelne Spektralbereiche fehlen.

Umso mehr überrascht es, dass Delfine über mehrere Kilometer hinweg problemlos unter Wasser kommunizieren und mit ihren Ultraschallsignalen Beutefische sowie Feinde orten. Eine Analyse ihrer Botschaften zeigt, dass die Tiere dabei keine starren Frequenzen verwenden, sondern die Höhe der Töne in einem sehr breiten Frequenzspektrum kontinuierlich variieren.

EvoLogics, ein Spin-off-Unternehmen der Technischen Universität Berlin, versucht solche in Jahrmillionen optimierten Strategien der Natur in technische Produkte umzumünzen. Die Unternehmensgründer Konstantin Kebkal und Rudolf Bannasch fanden heraus, dass das »Sweepen« der Delfine tatsächlich die Interferenzen der Mehrwegeausbreitung vermeiden hilft: Wie beim Pulsverfahren können Echos aufgrund der variierten Frequenzen nicht mehr destruktiv interferieren. EvoLogics hat demgemäß ein Modem entwickelt, das die zu übertragenden Informationen nicht nur wie üblich einem Trägersignal durch Phasen- oder Frequenzmodulationen aufprägt (siehe Kasten), sondern dessen Frequenz auch gleichmäßig verändert – die Wissenschaftler lassen das Signal »singen«. Dieses Gerät kommt demnächst auf den Markt.

Nachdem die Echos so ihren Schrecken verloren haben, sollen sie nach dem Willen EvoLogics zudem als Kopien des Sendesignals von Nutzen sein. Dazu werden ihre Laufzeitunterschiede in einen Frequenzversatz umgewandelt, sodass die einzelnen »Clone« nunmehr separat in unterschiedlichen Frequenzbändern vorliegen. Ähnlich wie beim automatischen Sendesuchlauf eines Radioempfängers kann nun der Kanal mit dem klarsten Signal ausgewählt werden. In einer Ausbaustufe wollen die Entwickler mehrere Kopien so miteinander verrechnen, dass sich die Signalenergie summiert beziehungsweise das Rauschen herausgemittelt wird.

Spezielle Algorithmen sollen zudem die Struktur der Mehrwegeausbreitung und andere Störeinflüsse analysieren, um die sich dynamisch ändernden Übertragungsbedingungen im Meer zu erfassen und die Parameter des Modems nachzuregeln. Damit wird die bisherige Methode obsolet, durch hohe Senderleistung sozusagen alles Rauschen zu übertönen. Das kommt dann letztlich auch den biologischen Vorbildern zugute: In Tests reagierten dressierte Delfine mit großem Interesse auf das Sendemodem und zwitscherten munter mit. Vielleicht gelingt es ja eines Tages, eine echte Kommunikation mit diesen Tieren aufzubauen. ◁

Werner Gans

Der Autor ist promovierter Chemiker. Er arbeitet im Nebenberuf als Wissenschaftsjournalist.

WICHTIGE ONLINE-ADRESSEN

Aetherforschung
Neue Impulse für die Naturwissenschaften, und die Mathematik
www.aether-research.de

Brennstoffzellentechnik
Reformierung
CO-Eliminierung
Heterogene Katalyse
www.kat-chem.de

Dipl.-Ing. Runald Meyer VDI
Entwicklung, Konstruktion,
Technische Berechnung
Strömungsmechanik
www.etastern.de

DOK – Düsseldorfer Optik-Kontor
Kontaktlinsen online bestellen
www.dok.de

Eveni – the conference management solution
Wissenschaftliche Konferenzen effizient organisieren mit Internet-basierten Werkzeugen
http://eveni.com

Forschungszentrum Jülich
Brennstoffzellen, Technologie,
Jobs, Dissertationen, Diplomarbeiten
www.fuelcells.de/jobs

Forum MedizinTechnik und Pharma in Bayern e.V.
Innovationen für die Medizin
www.forum-medtech-pharma.de

Jagd auf Zahlen und Figuren – Mathematik die Spaß macht! –
Interessante Aufgaben und Workshops für Schüler und Studenten
www.zahlenjagd.at

Kernmechanik – die neue Quantenphysik
alle Kerne, alle Kräfte und Kosmologie
www.kernmechanik.de

Monoporöse Schäume
Erzeugung von Schäumen
Analytik von Schäumen
MIR-Chem GmbH
www.mir-chem.de

PARA BioScience GmbH – We Are Immunology –
Immunologische Testungen, in vivo-in vitro. Präklinik. Antikörper auch durch Gensequenz.
www.para-bioscience.com

Prof. (apl.) Dr. Dr. habil. Harald Reiss
Controlling/upgrade F+E-Antrag/Projekt
Patent-Einspruchsmaterial, Simulations
www.haraldreiss.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 80,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing
Mareike Grigo
Telefon (02 11) 887-23 94
E-Mail: m.grigo@vhb.de

MEDIZINER-NACHWUCHS

Ausbeutung statt Ausbildung

Besonders Jungmediziner kehren dem Krankenhaus den Rücken oder gehen ins Ausland. Starre Hierarchien, Hofstaatbildung, unzählige Überstunden und zunehmende Verwaltungsarbeit statt Ausbildung schrecken ab. Die Folge: zunehmender Mangel an Fachärzten.

Von Catharina Uhl

Benutzen Sie gefälligst *beide* Ihrer Gehirnhälften, wenn Sie bei uns arbeiten, schließlich bekommen Sie volles Gehalt!«, brüllt der vermummte Herr im grünen Outfit vom anderen Ende des Tisches. Der Angesprochene schreckt hoch aus seinem Halbschlaf. Was war passiert? War der Haken, den er halten sollte, verrutscht? Schon möglich. Schließlich hat er seit zwölf Stunden nichts gegessen und ist seit 36 Stunden im Dienst. Da ist selbst der größte Held nicht mehr grenzenlos einsatzfähig.

Normalerweise jedenfalls. Aber wir befinden uns hier im Operationssaal einer großen deutschen Universitätsklinik. Es ist Montagmorgen, 8.00 Uhr. Der brüllende Herr, ein Chefarzt, versucht gerade, einen seiner Assistenzärzte weiterzubilden. Volles Gehalt bedeutet die Vergütung von 38,5 Stunden in der Woche nach dem Angestelltentarif BAT II A. Überstunden gibt es offiziell nicht. Nachtdienste sind Bereitschaftsdienste. Sie werden zwar zusätzlich vergütet, aber nur mit maximal achtzig Prozent des Grundgehalts. Dieser Anteil entspricht dem angenommenen Arbeitseinsatz in der Nacht. Oft wird im Anschluss daran gleich am Morgen wieder der reguläre Dienst angetreten. Umgerechnet auf die Wochenarbeitszeit von durchschnittlich siebzig Stunden sind demnach Stundenlöhne von weniger als acht Euro keine Seltenheit.

Das Phänomen ist bekannt. Das deutsche Gesundheitswesen ist chronisch krank und seine Patientenakte dicker als die aller Patienten eines Universitätsklinikums zusammen. Der Marburger Bund, gesundheits- und berufspolitische Interessenvertretung für Mediziner, weiß das und beklagt deren schlechte Arbeitsbedingungen. Überall in Deutschland fehlen arbeitswillige Ärzte. Wöchentlich wächst der Teil mit Stellenangeboten im Deutschen Ärzteblatt, dem größten Stellenmarkt für Mediziner. Unglaublich, denn die Universitäten bringen weiterhin eine hohe Anzahl von Jungärzten hervor, und Humanmedizin zählt nach wie vor zu den begehrtesten Studienfächern.

Wie kommt es, dass rund ein Drittel aller Medizin-Absolventen nach der Uni den Kittel an den Nagel hängt? Ist es das geringe Einkommen, das sie besonders in den 18 Monaten »Arzt im Praktikum« (AiP) erwartet? Oder ist es Faulheit, mangelnde Einsatzbereitschaft, fehlender Idealismus?

Fragt man den eingangs genannten grünen Herrn oder einen seiner Kollegen, fällt die Antwort nicht schwer: »Besonders die Arbeitsbedingungen in Universitätskliniken werden vom Nachwuchs offenbar als schlecht und unattraktiv empfunden.« Die Jugend scheint verwöhnt, will mehr Geld, weniger Arbeit und ist bei weitem nicht engagiert genug.

Man schaffe einfach die AiP-Zeit wieder ab und schon werden die Jungärzte zurück in die Krankenhäuser zur Arbeit strömen. Also einfach ein ökonomisches Problem? Menschen, die sich von der Wahlwerbung zur letzten Bundestagswahl beeinflussen ließen, könnten dies denken. Ein Wahlplakat einer der großen Parteien Deutschlands warb dort mit einer jungen Ärztin, die eine Patientenakte trug. Darunter stand: »Wir wollen, dass man Sie auch künftig nach Ihrem Befinden fragt, nicht nach Ihrem Einkommen.«

Perspektiven im Ausland?

»Es fehlt neuerdings an Bewerbern mit geeigneter Qualifikation«, klagte vor kurzem der Dekan einer großen deutschen Universitätsklinik. Er könne fünfzig Stellen nicht besetzen, da sich keine passenden Bewerber fänden. Ist eine Generation von minderbegabten Medizinern herangewachsen, die trotz Numerus clausus, einem mindestens sechsjährigen Studium, Staatsexamen, Praktischem Jahr und AiP in Wirklichkeit gar nicht zur ärztlichen Tätigkeit taugt?

Wie nur lässt es sich erklären, dass der Großteil der deutschen Mediziner-Flüchtlinge gerade dorthin abwandert, wo lange Wartezeiten der Patienten auf Operationen oder eine medizinische Versorgung in Abhängigkeit vom Versicherungsstatus des Patienten üblich sind? Immerhin sind das Länder, in denen ein Nachtdienst alle drei bis vier Tage ohne Überstundenfrei die Regel und an Urlaub schon gar nicht zu denken ist. Arbeitszeiten und -systeme wie in Großbritannien und in den USA scheinen also Jungärzte nicht unbedingt von der Ausübung ihres Berufes abzuschrecken. Viel-

Krank ist nicht nur der Patient, sondern auch das Gesundheitssystem, das junge Ärzte bis an den Rand der Erschöpfung ausbeutet.

MAURITIUS

mehr ist es der Wunsch nach Ausbildung, der sie auf ihrem Weg ins Ausland beflügelt. Sie hoffen, dort bessere Lehrer zu finden. Dafür sind die jungen Mediziner offenbar auch zu gewissen Opfern bereit. Denn welcher hoch qualifizierte Akademiker möchte schon jahrelang Hilfsdienste leisten und dafür noch ständig kritisiert werden? Jeder Mensch braucht Perspektiven. Und Vorbilder. Was passiert, wenn diese fehlen?

Die Folgen liegen auf der Hand: Bald wird es in Deutschland nicht mehr nur viele unbesetzte AiP- und Assistenzarztstellen geben. Auch an Fachärzten wird es mangeln. Und die wenigen Fachärzte, die es dann noch gibt, werden zum großen Teil schlecht ausgebildet sein oder am Burn-out-Syndrom leiden.

Die Schweiz macht's vor: Weiterbildung wird überprüft

Am fehlenden Engagement kann es nicht liegen. Medizin zählt zu den spannendsten Fächern und vielschichtigsten Berufen. Wo kann man sonst noch so vielseitig arbeiten, so unterschiedliche Charaktere treffen und so viel über Menschen lernen? Schließlich hält das Gefühl so manch eines Arztes, gebraucht zu werden und etwas Sinnvolles zu tun, auch den »Patienten« deutsches Gesundheitssystem am Leben. Noch jedenfalls.

Hat ein Chirurg eine infizierte Narbe vor sich, so wird er versuchen, das faule Gewebe herauszuschneiden, damit das gesunde Fleisch wieder zusammenwachsen kann. Wie könnte ein Heilungsvorschlag für die kranke Hochschulmedizin lauten? Ein Blick über die Grenzen unseres Landes hinweg in die Schweiz zeigt Verheißungsvolles: Dort gibt es viele zufriedene Fachärzte, die auch noch ausgebildet wurden. Denn nicht nur die Facharztaspiranten werden geprüft, sondern auch die Weiterbildungsbeauftragten. Die Ergebnisse werden jährlich veröffentlicht. Somit spricht sich schnell herum, wer seinen Verpflichtungen nachkommt, auch auf der Seite der Ausbilder (www.fmh.ch).

Ein Arzt sollte Patienten als Vorbild dienen. In der heutigen Medizin bedeutet dies jedoch nichts Gutes. Denn wenn ein Arzt nach dreitägiger ununterbrochener Dienstschicht ohne ausreichende Nahrungsaufnahme, geschweige denn Schlaf, Menschen behandelt, ist die Gesundheit aller Beteiligten gefährdet.

Peter Müller, Psychiater am Uniklinikum Göttingen, sieht in dem Verhalten vieler Krankenhausärzte, die freiwillig zwanghaft rund um die Uhr schuften, eine psychische Erkrankung, wie er kürzlich in einem Symposium berichtete. Denn diese Kollegen würden häufig an einer psychogenen Depression leiden, deren Ursachen in einer frühkindlichen emotionalen Mangelerfahrung zu suchen seien. Die Folgen könnten fatal sein. Das gestörte Selbstwertgefühl müsse kompensiert werden – durch mehr Leistung, gute Zeugnisse, Einsatz für andere Menschen. »Auf diese Weise hoffen die Arbeitswütigen, dass ihre Mütter, die sich meist längst im Himmel befinden, endlich auf sie schauen, um ihnen doch noch zu sagen ›ich liebe dich‹«, erklärt der Psychiater. Ein unerfüllbarer Wunsch, gegen den nur eine Psychotherapie helfen würde, um die Konflikte aufzudecken und nach alternativen Lösungen zu suchen.

Neue Stellen durch neue Strukturen

Ein guter Arzt sollte Gesundheit vorleben. Viele junge Mediziner haben dies noch nicht vergessen. Wenn sie das aber im Krankenhaus nicht umsetzen können, leisten sie ihren Beitrag hierzu eben in anderen Bereichen – etwa als Journalisten, Autoren, Moderatoren von Gesundheitssendungen im Fernsehen, als Schauspieler, in der Pharmaindustrie, als Unternehmensberater oder Unternehmer. Kaum einer dieser »Abtrünnigen« möchte jemals in die starren Hierarchien und den Verwaltungsberg der Krankenhausmedizin zurückkehren.

(Jung-)Mediziner haben keine Lobby. Damit sind sie ausnutzbar – von allen Seiten. Dabei könnten ein paar einfache Maßnahmen Abhilfe schaffen wie etwa Qualitätsmanagement und Vernetzung durch die Weiterbildungsassistenten selbst.

Spanische Assistenzärzte haben es vorgemacht: Gemeinsam zogen sie vor den Europäischen Gerichtshof und bekamen Recht: Bereitschaftsdienste sind Arbeits- und nicht Ruhezeit. In Deutschland gilt dieses Gesetz bislang nicht. Denn nach Schätzungen der Deutschen Krankenhausgesellschaft müssten dafür im Mittel zehn neue Arztstellen pro Krankenhaus geschaffen werden. Das ergäbe einen Bedarf von 25 000 zusätzlichen Ärzten. Dieser könnte gegenwärtig nicht annähernd gedeckt werden. Schon gar nicht, wenn sich nicht gleichzeitig die Strukturen ändern.

Die Hoffnung bleibt, dass angesichts der Schwere der Krankheit des deutschen Gesundheitssystems die Klinikchefs zusammen mit ihren ärztlichen Mitarbeitern beginnen, neue Modelle der Weiterbildung und Arbeitszeitgestaltung zu entwickeln und umzusetzen – zum Wohle aller. ◁

Catharina Uhl ist Medizinerin und war an mehreren deutschen Universitätskliniken tätig.

6. RAHMENPROGRAMM

Strukturgerüst für die europäische Forschung

Die Europäische Union will einen gemeinsamen Forschungsraum für alle Mitgliedstaaten etablieren.

Von G. Hartmut Altenmüller

Der Titel verrät wenig Neues, der Inhalt schon: Das »6. Rahmenprogramm der Europäischen Gemeinschaft im Bereich der Forschung, technologischen Entwicklung und Demonstration«, das Anfang 2003 in Kraft getreten ist, bereitet einen »europäischen Forschungsraum« vor. Das bis 2006 geltende Programm begnügt sich nicht wie seine Vorgänger damit, eine eher willkürlich zusammengekommene Anzahl von Projekten zu fördern. Vielmehr soll der Wissenschaft in Europa ein Strukturgerüst eingezogen werden. In der künftigen Verfassung der Europäischen Union wird die gemeinsame Forschungspolitik fest verankert sein. Sie soll die wissenschaftlichen und technologischen Kapazitäten der Mitgliedstaaten weit enger als in den letzten Jahrzehnten bündeln.

Beunruhigender Anlass dazu ist, dass die meisten EU-Staaten in ihrer Forschungsleistung und vor allem in den nationalen finanziellen Aufwendungen dafür drastisch hinter die Konkurrenten USA und Japan zurückgefallen sind. Nur in Schweden und Finnland lagen die Ausgaben für Forschung und Entwicklung (FuE) im Jahre 2000 höher als der von Japan erreichte Wert von drei Prozent des Bruttoinlandsprodukts. Die USA gaben 2,69 Prozent für FuE aus, Deutschland immerhin noch 2,48 Prozent, während die EU-Staaten im Durchschnitt nur 1,93 Prozent ihres Bruttoinlandsprodukts in FuE investierten. Nach einem Beschluss des Europäischen Rates soll dieser Mittelwert bis 2010 auf drei Prozent steigen, damit Europa auf den weltweit ersten Platz in der Wissenschaft vorrückt. Ob das gelingt, ist zweifelhaft.

Fraglich bleibt auch, ob ein europäischer Forschungsraum die nationalen Egoismen beseitigen kann. Transnationale Koordination und Kooperation empfinden viele als Bevormundung. Auch ein dazu neu einzurichtender »Europäischer Forschungsrat« (European Research Council, ERC) wird oft als eher hinderlich angesehen. Der Vielfalt des europäischen wissenschaftlichen Lebens wäre besser gedient, wenn die nationalen Forschungsräte eng zusammenarbeiteten.

Diese Forschungsräte gehören der Europäischen Wissenschaftsstiftung (European Science Foundation, ESF) an. Für sie hat eine Expertengruppe unter Vorsitz von Sir Richard Sykes vom Imperial College in London zwei Möglichkeiten zur Diskussion gestellt: Entweder solle die Wissenschaftsstiftung umgebaut oder ein ganz neuer Forschungsrat gebildet werden. Außerdem wird bis kommenden Herbst eine Gruppe unter dem Vorsitz des früheren Unesco-Generaldirektors Federico Mayor einen Vorschlag ausarbeiten. Auch der Nobelpreisträger Erwin Neher, der Mitglied des europäischen Beratergremiums für Forschung ist, fordert einen ERC (siehe Interview). Die Diskussion darüber muss bis zum nächsten Jahr entschieden sein, damit der Europäische Forschungsrat in das 7. Rahmenprogramm aufgenommen werden kann.

Gebündelte Fachkompetenz

Doch auch die großen europäischen Forschungseinrichtungen sehen sich als Plattform für effiziente Zusammenarbeit und Koordinierung. Sieben von ihnen haben sich zur Koordinierungs- und Kooperationsgruppe EIROforum (European Intergovernmental Research Organisations) zusammengeschlossen: Cern (Teilchenphysik), EMBL (Molekularbiologie), Esa (Raumfahrt), Eso (Astronomie), ESRF (Synchrotronstrahlung), ILL (Neutronenquelle) und EFDA (Fusionstechnik).

Insbesondere will EIROforum seine »gebündelte Fachkompetenz in der Grundlagenforschung und Steuerung internationaler Großvorhaben zum Nutzen der europäischen Forschung und Entwicklung einsetzen, und zwar über die vorhandenen engen Kontakte zwischen den Mitgliedsorganisationen und ihren jeweiligen europäischen Forscherkreisen«. Dazu zählt auch die Bewertung neuer Großforschungsinfrastrukturen. Ein erster kritischer Punkt ist hier die europäische Spallationsquelle ESS, die der deutsche Wissenschaftsrat kürzlich abgelehnt hat.

Ein Kernproblem bei der Realisierung europäischer Forschungsprogramme sind die Rollen, welche die Universitäten sowie die Klein- und Mittelunternehmen spielen. Beide Gruppen werden im Wettbewerb von Großorganisationen bedrängt: In der Grundlagenforschung kommen die Universitäten nur schwer gegen die großen hochschulunabhängigen Forschungszentren an. Und die Klein- und Mittelunternehmen können bei Innovationen nicht mit Großunternehmen mithalten. Kooperationen sind möglich und wurden letzten Herbst auf einer Konferenz in Brüssel diskutiert; Lösungen gibt es indes noch keine.

Am 6. Rahmenprogramm wirken die künftigen EU-Mitgliedsländer von Estland bis Slowenien voll mit. Überdies sollen EU-geförderte Arbeiten stärker als bisher auch Länder außerhalb der Gemeinschaft einbeziehen.

Inhaltlich legt das 6. Rahmenprogramm die offenkundigsten Schwächen Europas bloß: Mängel bei der technologischen Innovation, der grenzüberschreitenden Mobilität der Forscher (insbesondere von Frauen und wissenschaftlichem Nachwuchs), beim wechselseitigen Zugang zu Forschungseinrichtungen und nationalen Förderprogrammen, beim Dialog zwischen Wissenschaft und Gesellschaft sowie bei der Koordination und Zusammenarbeit in der Forschung.

Neue Instrumente sollen europäische »Exzellenz-Netzwerke« der Spitzenforschung und zeitlich begrenzte »Integrierte Projekte« sein. Ferner soll sich die Gemeinschaft an genau festgelegten Programmen mehrerer Mitgliedstaaten beteiligen. Dazu kommen sechs schon bisher geförderte Verfahren: unter anderem spezifische Projekte für Klein- und Mittelunternehmen, Koordinierungsmaßnahmen, das Marie-Curie-Programm zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, Forschungs- und Innovationsprojekte unterschiedlicher Art sowie die nichtnukleare Arbeit der Gemeinsamen Forschungsstelle.

Das 6. Rahmenprogramm sieht (einschließlich Euratom) Ausgaben in Höhe von insgesamt 17,5 Milliarden Euro vor. Sein Schwergewicht liegt bei sieben thematischen Prioritäten, die rund zwei Drittel der Mittel für nichtnukleare Forschung

INTERVIEW

Exzellenz in der Grundlagenforschung

Der Nobelpreisträger Erwin Neher, Direktor am Max-Planck-Institut für Biophysikalische Chemie in Göttingen und Mitglied des European Research Advisory Board, meint, ein Europäischer Forschungsrat könne die Grundlagenforschung eher stärken als die vorgesehenen Exzellenz-Netzwerke.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Neher, welche Funktion haben die Exzellenz-Netze?

Professor Erwin Neher: In den ersten Entwürfen des 6. EU-Rahmenprogramms waren die Funktionen klar getrennt: Integrierte Projekte sollten ziel- und produktorientiert sein, Exzellenz-Netzwerke dagegen eine Wissensbasis schaffen ohne ein präzise formuliertes Ziel oder Produkt. Diese Aufteilung schien mir sehr sinnvoll. Ich glaubte, die EU-Kommission habe endlich eingesehen, dass die Wissensgrundlage eine wichtige Basis ist für die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Wirtschaft. Europa sollte ja die fortschrittlichste wissensbasierte Gesellschaft der Welt werden.

Spektrum: Dieses Ziel gilt jetzt nicht mehr?

Neher: Leider hat sich das bei der weiteren Vorbereitung des Rahmenprogramms total umgedreht. Wissensgrundlagen zu schaffen war plötzlich auch Aufgabe der Integrierten Projekte. Die Exzellenz-Netzwerke dagegen sollten nunmehr hauptsächlich eine strukturierende Wirkung ausüben. Schließlich wurde bekannt, dass sie nicht für ihre Wissenschaft gefördert werden sollen, sondern lediglich für so genannte strukturierende und organisierende Maßnahmen.

Spektrum: Aber die Kommission betont noch immer, in Exzellenz-Netzen sollten Forschungsarbeiten gebündelt werden.

Neher: Die Exzellenz-Netzwerke haben vier Aufgaben. Für das Ziel, ein gemeinsames Forschungsprogramm durchzuführen, erhalten sie aber explizit kein Geld. Das gibt es nur für die anderen Aufgaben: integrierende Maßnahmen vornehmen – was immer das sein mag –, die Wissenschaftslandschaft umstrukturieren und die Exzellenz ausbreiten. Die Zuwendungen werden den Netzwerken allerdings global gegeben. Da mag es ihnen, wenn sie sich einig sind, vielleicht gelingen, etwas davon abzuzweigen für die eigene Wissenschaft.

Spektrum: Das 6. Rahmenprogramm ist also in diesem Punkt gar nicht so neu, wie es zunächst schien …

Neher: Ich bin, was die Exzellenz-Netzwerke angeht, sehr enttäuscht. Was diese speziell machen sollen, ist den wenigsten Leuten klar. Es gibt einige gute Vorschläge, die zeigen in bestimmten Bereichen einen Bedarf an strukturierenden Maßnahmen auf. Aber zumeist ist das nicht der Fall, und die Vorschläge für Exzellenz-Netzwerke unterscheiden sich kaum von den Vorschlägen für Integrierte Projekte.

Spektrum: Was wünschen Sie sich generell von der Realisierung des 6. Rahmenprogramms?

Neher: Die Wissensbasis, also die Grundlagenforschung, sollte nach Richtlinien und Verfahren gefördert werden, die auf ihre besonderen Erfordernisse Rücksicht nehmen. Die verbesserten Verfahren des 6. Rahmenprogramms zur Evaluation von Anträgen kommen jetzt dem näher, was typischerweise in der Forschung praktiziert wird, etwa bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft oder auch bei internationalen Forschungsorganisationen. Ich hoffe daher, dass die Auswahl der Projekte im 6. Rahmenprogramm besser sein wird als im 5. Programm.

Vor allem sollten nun die Überlegungen, einen Europäischen Forschungsrat zu gründen, vorankommen – aber nicht als Teil des Rahmenprogramms. Die Erfahrung, wie die Exzellenz-Netzwerke unter das Diktat der Anwendungsorientierung gestellt wurden, hat in mir die Überzeugung gefestigt, dass wir von der Grundlagenforschung her gesehen mit den Rahmenprogrammen nie so richtig glücklich werden. Deshalb wünsche ich mir, dass ein Europäischer Forschungsrat zu Stande kommt, dessen Aufgabe dann ganz dezidiert die Förderung der Grundlagenforschung sein sollte.

Spektrum: Wie könnte dieser Europäische Forschungsrat aufgebaut sein?

Neher: Was ich mir sehr gut als Rollenmodell vorstellen kann, ist die Art und Weise, wie Embo, die Europäische Organisation für Molekularbiologie, und Cern, das Europäische Labor für Teilchenphysik, für ihre Bereiche Grundlagenforschung organisieren. In beiden Organisationen haben wir gute Beispiele, wie Forschung auf europäischer Ebene auf hohem Niveau gefördert werden kann. Wenn möglichst viel davon im Europäischen Forschungsrat verwirklicht wird, dürfte die Sache auf dem richtigen Weg sein.

Das Interview führte **G. Hartmut Altenmüller**.

in Höhe von 16,27 Milliarden Euro beanspruchen. Dazu sind bei der EU-Kommission schon vor dem offiziellen Beginn des Programms mehr als 11 700 Interessenbekundungen eingegangen.

In diesen *Expressions of Interest* stehen »Technologien für die Informationsgesellschaft« eindeutig im Vordergrund, gefolgt von »Genomik und Biotechnologie im Dienste der Gesundheit« sowie »Nanotechnologie«. Wissenschaftler und Institute, die sich an solchen thematischen Prioritäten des Rahmenplans beteiligen wollen, müssen sich zu Konsortien zusammenschließen.

Viele regionale Treffen führen derzeit in den bürokratischen Dschungel des Förderprogramms ein. Auch im Internet informieren das Bundesministerium für Bildung und Forschung (www.rp6.de) und die Koordinierungsstelle der Wissenschaftsorganisationen (www.kowi.de). Als Mobilitäts- und Kontaktzentrum nahm im Mai das neue EU-Referat der Alexander von Humboldt-Stiftung (www.humboldt-foundation.de) in Bonn seine Arbeit auf. ◁

G. Hartmut Altenmüller ist Bonner Korrespondent von Spektrum der Wissenschaft.

Das zähe Leben der Kalten Fusion

Erinnern Sie sich noch? Vor über einem Jahrzehnt, im März 1989, trat der angesehene Elektrochemiker Martin Fleischmann mit seinem jüngeren Kollegen Stanley Pons an der Universität von Utah vor die Presse, um eine wissenschaftliche Sensation zu verkünden. In einem simplen Glasgefäß hatten die beiden bei Raumtemperatur angeblich Atomkerne des Wasserstoff-Isotops Deuterium verschmolzen – ein Prozess, den die Natur nur im Herzen der Sonne bei unvorstellbar hohen Drücken und Temperaturen zu Wege bringt.

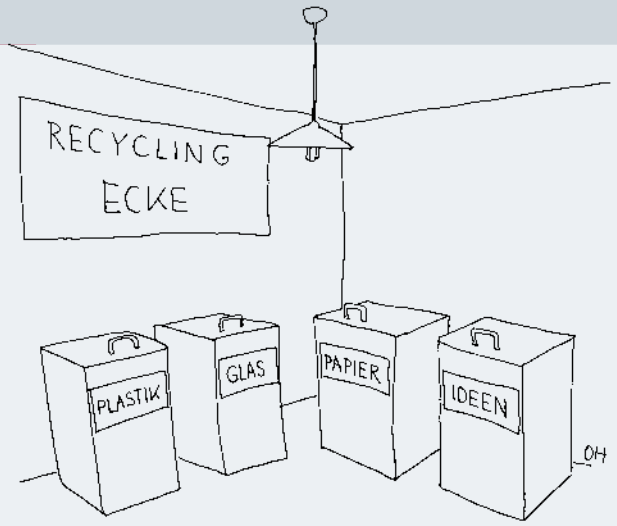
Ähnliche Bedingungen in irdischen Fusionsreaktoren zu schaffen ist seit Jahrzehnten das Ziel aufwendiger internationaler Forschungsprojekte. Als ferner Lohn der gigantischen Mühe winkt eine Form der Energieerzeugung, deren Wirkungsgrad unsere Sonne tagtäglich vor Augen führt.

Doch Fleischmann und Pons zufolge genügte es, durch ein Glas mit »schwerem Wasser« – in dem Deuterium den üblichen Wasserstoff vertritt – mehrere Stunden lang elektrischen Strom zu leiten, um in einer Palladium-Elektrode Deuterium einzulagern und dort zur Fusion zu zwingen. Als Indiz für die Kernverschmelzung galt das plötzliche Auftreten zusätzlicher Wärme, die gelegentlich sogar das Palladium zum Schmelzen brachte. Zudem wurden schwache Gammastrahlen und geringe Mengen von Helium sowie des Wasserstoff-Isotops Tritium als Indiz für Fusionsvorgänge interpretiert.

Das Problem war – neben der physikalischen Unwahrscheinlichkeit – die Unbeständigkeit der Resultate. Manche Teams fanden beim Versuch, die vermeintliche Kalte Kernfusion zu replizieren, niemals Überschusswärme, andere nur hin und wieder. Auch die Gamma-, Helium- und Tritiumwerte waren uneindeutig. Die meisten Forscher wandten sich bald achselzuckend anderen Themen zu. Fleischmann und Pons verschwanden aus dem Rampenlicht der wissenschaftlichen Öffentlichkeit. Das Thema schien erledigt.

Wirklich? Genau genommen wurde die Kalte Fusion ebenso wenig bewiesen wie falsifiziert. Fleischmann und Pons ließen sich 1993 in Südfrankreich nieder, wo sie einige Zeit lang, gesponsert vom Autokonzern Toyota, an elektrochemischen Systemen zur Kernfusion weiterforschten. Mehrere Wissenschaftler erproben bis heute verschiedene Kombinationen von Palladium und schwerem Wasser in der Hoffnung, doch noch den Heiligen Gral der Fusion im Wasserglas zu erringen. Fleischmanns Glaube ist ungebrochen. Er sieht sich als Opfer einer Verschwörung des Schweigens, hinter der er einerseits die Erdölkonzerne vermutet, welche die Konkurrenz seiner alternativen Energiequelle fürchten, andererseits das Militär, das eine »Kernfusion für jedermann« verhindern will.

In der Tat ist die Kalte Fusion nicht passé, sondern führt ein Schattendasein in der Grauzone zwischen Militärforschung, Hobbywissenschaft und Spinnerei. Auf kleiner Flamme finanzierte die US-Marine zehn Jahre lang mehrere Projekte zur Energiegewinnung mittels Kalter Fusion. Das Space and Naval Warfare Systems Center der US-Navy in San Diego veröffentlichte im Vorjahr eine umfangreiche Studie, die einräumt,



dass in vielen Fällen auf ungeklärtem Wege Überschussenergie erzeugt worden sei (*New Scientist*, 29. März 2003).

Allerdings hat die Navy-Studie eher den Charakter eines Nachrufs. Einzelne Wissenschaftler – meist Chemiker – zweigen dennoch mit Duldung ihrer Institutionen Forschungsmittel für Palladium-Deuterium-Experimente ab oder forschen im privaten Kellerlabor. Sie veranstalten Kongresse und publizieren hin und wieder in Fachzeitschriften für Elektrochemie – oder in *Infinite Energy*.

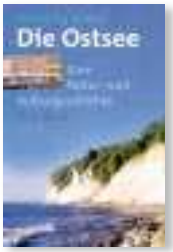
Die Zeitschrift *Infinite Energy*, großenteils finanziert vom Sciencefiction-Autor Arthur C. Clarke (»2001 – Odyssee im Weltraum«), hat mit normaler Wissenschaft wenig am Hut. Sie ist offen für die abstrusesten Spekulationen – vom Anzapfen der quantenphysikalischen Vakuumenergie über Alchemie bis eben zur Kernfusion im Wasserglas.

Fast alles spricht dafür, dass die Kalte Fusion eine Schimäre ist, die am Rande der normalen Wissenschaft umhergeistert und dabei – wenn auch erstaunlich langsam – verblasst. Doch auf der Suche nach diesem Gespenst und bei den Versuchen, es zu vertreiben, sind einige Phänomene beobachtet worden, die bis heute der Erklärung harren. Höchstwahrscheinlich steckt dahinter keine »neue Physik«, sondern ein anekdotisches Zusammentreffen jeweils besonderer Umstände: winzige Verunreinigungen der benutzten Palladium-Elektrode und die Eigenart ihrer Kristallstruktur nahe der Oberfläche, Spuren von natürlichem Tritium und anderen radioaktiven Substanzen. Solche »Schmutzeffekte« übergeht die normale Wissenschaft nonchalant, selbst wenn sie sie nicht umfassend zu erklären vermag.

Mitunter erweist sich ja ein vermeintlicher Schmutzeffekt als Keim einer wissenschaftlichen Revolution. Das geschieht selten, aber es kommt vor – sonst würden wir noch heute auf dem geozentrischen System beharren und die Bewegungen der Himmelskörper mit immer neuen Epizykeln erklären. Das lange Leben der Kalten Kernfusion erinnert daran, dass solche Revolutionen nicht aus dem Herzen der normalen Wissenschaft kommen, sondern von ihren verachteten Rändern.

Michael Springer

Der Autor ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.



GEOGRAFIE

Hansjörg Küster

Die Ostsee

Eine Natur- und Kulturgeschichte

C. H. Beck, München 2002. 357 Seiten, € 34,90

Auf einer Reise über die Ostsee entwarf Johann Gottfried Herder 1769 die Grundzüge einer neuen Forschungsrichtung, die sich der umfassenden Darstellung von Sprache und Kultur eines jeden Landes widmen sollte. Der bedeutende deutsche Kulturphilosoph und Dichter war davon überzeugt, dass Völker und Nationen ihre Identität vornehmlich über die Sprache entwickeln – vor allem durch die Überlieferung von Märchen, Sagen und Volksliedern. Hansjörg Küster, Professor für Pflanzenökologie am Institut für Geobotanik der Universität Hannover, ist angetreten, Herders Ansatz zur »Landeskunde« naturgeschichtlich zu erweitern: Neben der Sprache und der Geschichte haben auch die Gegebenheiten der Natur wesentlich zur kulturellen Selbstfindung der Ostseeanrainer beigetragen.

Damit weckt der Autor große Erwartungen. Nicht nur um Herders »Individualität des Werdens der Völker« soll es gehen, sondern noch umfassender »um das Erkennen der individuellen Einheit von Natur und Kultur«. In der Tat ist die Ostsee für die angestrebte Synthese von Natur- und Kulturbetrachtung wie geschaffen, denn sie ist in der vollen Bedeutung des Wortes einmalig: »Kein anderes Meer ist so jung, war in den letzten Jahrtausenden so vielen Veränderungen unterworfen. Nirgendwo sonst tauchten in den letzten Jahrzehnten derartig viele Inseln aus dem Meer empor, nirgendwo sonst werden in ähnlicher Weise Küsten zerstört und neu aufgebaut, nirgendwo sonst auf der Welt gibt es so viel Brackwasser.«

Erst vor 15 000 Jahren, als die mächtigen Gletscher der Weichsel-Eiszeit bis auf relativ kleine Restflächen abschmolzen, konnte das »Mare Balticum« entstehen. Die Küsten und der Untergrund bestehen überwiegend aus Gesteinen, die zu den ältesten Europas zählen. Und unter dem größten Teil der See liegt ehemals trockenes Land. Die Ostsee ist »Das alte Land unter dem jungen Meer« – so Küsters schönste Kapitelüberschrift.

Trotz seiner kurzen Geschichte unterlag das »Mittelmeer des Nordens« immer wieder großen geologischen Veränderungen, die noch keineswegs abgeschlossen sind. Zeitweise war die Ostsee, ohnehin eher eine abgesonderte Meeresbucht als ein eigenständiges Meer, ein reiner Süßwassersee. Das heutige Brackwassermeer ist nur über kleine Rinnsale mit der Nordsee und dem Atlantik verbunden, sodass über den Regen und die Flüsse stets mehr Süß- als Salzwasser hinzukommt.

Küster geht auch im kulturgeschichtlichen Teil seiner Darstellung immer wieder auf naturgeschichtliche Besonderheiten ein, sofern sie die Besiedlung des Ostseeraums durch den Menschen beeinflussten. Der Autor macht plausibel, warum Küste und Hinterland in unterschiedlichen Formen besiedelt wurden, warum sich die Gegensätze zwischen Ackerbau- und Jägerkulturen im Ostseeraum länger erhielten als in anderen Regionen Europas.

Der frühzeitig in Schwung gekommene Handel markiert zugleich den Beginn des kulturellen Aufstiegs der Ostseeregion. Ob Küster nun einen Einblick in die Welt der Wikinger gibt, Aufstieg und Niedergang der mächtigen Hanse skizziert, die Errichtung oder den Ausbau von Metropolen wie Stockholm oder Sankt Petersburg beschreibt – die Kulturgeschichte der Ostsee erweist sich von

Die Rauk-Formationen auf Fårö bildeten sich aus Kalkfelsen, deren oberer Teil zuerst aus dem Meer auftauchte. Die Basis des Felsens war der Brandung länger ausgesetzt und ist daher schmaler als der breite »Kopf«.

Die Marienburg, Sitz des Deutschen Ordens, an der Nogat, dem östlichen Mündungsarm der Weichsel

Anfang an als ebenso vielfältig und dynamisch wie die Naturgeschichte.

Doch zur eigentlichen Kulturgeschichte stößt Küster trotz manch verheißungsvoller Ansätze nie vor. Deshalb vermag das Buch auch nur so lange zu fesseln, wie der Autor bei der allgemeinen Geschichte der Ostsee und der Landschaften ihrer Küste bleibt. Versuche, die oftmals glanzvollen kulturellen Impulse der Region – etwa die Verbindung von Romantik und Ostsee durch Künstler wie Caspar David Friedrich – in die Argumentation aufzunehmen, wirken seltsam halbherzig und lassen überdies keine organische Einbettung in den Gesamtkontext erkennen.

Der Autor beschreibt bevorzugt technisch-zivilisatorische Prozesse, etwa die Modernisierung der finnischen Landwirtschaft oder die Erschließung schwedischer Erzvorkommen. Warum der Ostseeraum, in vielerlei Hinsicht eine Schicksalsgemeinschaft, es nie zu einer wirtschaftlichen und politischen Vereinigung brachte, wird nicht überzeugend erklärt. Von seiner einst so bedeutenden geistigen Ausstrahlung erreicht den Leser kaum mehr als ein matter Schimmer. Kant wird nur beiläufig erwähnt, Kopernikus gar nicht. Der deutsche Osten als Kulturlandschaft und die Tragödie seines Untergangs im Zweiten Weltkrieg wird nicht thematisiert, sondern im Telegrammstil abgehandelt.

Zum Ende des Buchs werden mehr und mehr konzeptionelle Schwächen sichtbar. Das Schlusskapitel »Die kulturelle Entdeckung der Ostsee, der Nationalismus, die Umweltverschmutzung und die Ferienidyllen« ist genau das, was die Überschrift befürchten lässt: Restpostenverwertung direkt aus dem Zettelkasten, inhaltlich grob sortiert, gedanklich unausgegoren, sprachlich anspruchslos.

Fazit: Dem anfangs noch mit Süßwasser verwöhnten Leser wird mehr und mehr ungenießbares Brackwasser eingeschenkt.

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist in Celle.

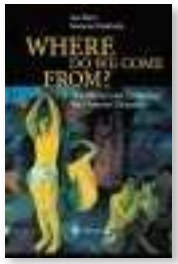
EVOLUTIONSBIOLOGIE

Jan Klein und Naoyuki Takahata

Where Do We Come From?

The Molecular Evidence for Human Descent

Springer, Berlin 2002. 462 Seiten, $ 49.95



Die molekularbiologische Methode zur Erforschung der menschlichen Evolution hat in den letzten 15 Jahren einen ungeheuren Aufschwung genommen, was auch in den Medien gebührend gefeiert wurde. Gemessen daran sind allgemein verständliche Bücher zum Thema recht dünn gesät; aus neuerer Zeit gibt es »Gene, Völker und Sprachen« von Luigi Luca Cavalli-Sforza (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/2000, S. 105), »The Molecule Hunt« von Martin Jones (Arcade Publishing, 2002) und »Die sieben Töchter Evas« von Bryan Sykes (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/2002, S. 110).

Im Gegensatz zu den genannten Büchern bettet das vorliegende Werk die Evolution des Menschen in den großen Kontext der Evolution des Lebens ein. Jan Klein vom Max-Planck-Institut für Biologie in Tübingen und Naoyuki Takahata von der Graduate University for Advanced Studies in Hayama (Japan) haben den Ehrgeiz, ihren Lesern statt seichter Unterhaltung echte Wissenschaft zu bieten. So erläutern sie in den ersten fünf Kapiteln die molekulare Grundlage der Vererbung, Techniken der DNA-Analyse und die Interpretation der Ergebnisse, bevor sie im Mittelteil mit dem »Baum des Lebens« zum Hauptthema kommen. Schätzungen der menschlichen Gesamtbevölkerung für prähistorische Zeiten und ein pessimistischer Blick in die Zukunft beschließen das Buch.

Immer wieder kommen die Autoren auf existenzielle Fragen zu sprechen: »Dass wir Menschen in einer zwecklosen Welt leben, ist schwer zu verdauen« (Kapitel 4). Ihre Reflexionen über die eigene Sterblichkeit und ihre Auseinandersetzung mit christlichem Gedankengut sind zwar nicht neu, machen aber vielleicht deutlich, dass auch wir Genetiker den Sinn des Lebens nicht in den Molekülen zu finden hoffen.

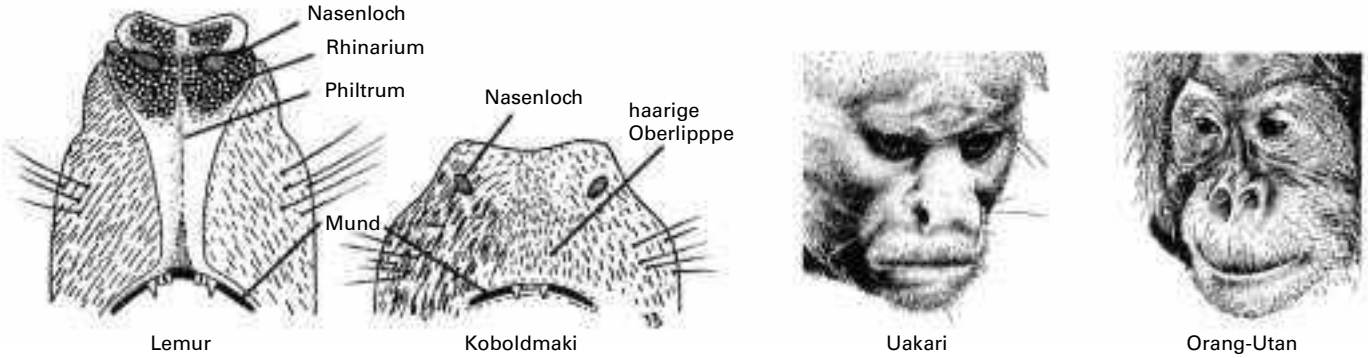
Die einleitenden Kapitel führen den Leser gemächlich, aber an fester Hand durch die Physiologie der Fortpflanzung und die Vererbungslehre, von Mendel und den Mitochondrien bis zur Mitose und dem »maximum parsimony«-Prinzip zur Rekonstruktion von Stammbäumen (der Abstammungsweg mit der minimalen Anzahl an Mutationen ist der wahrscheinlichste). Der Text ist größtenteils fehlerfrei; allerdings sind die Abbildungen ziemlich steril und schwarzweiß bis allenfalls zweifarbig, was zum Beispiel die Erklärung der DNA-Sequenzierung mittels Vierfarb-Fluoreszenz beeinträchtigt. Außerdem hätten die theoretischen Annahmen über Populationsgrößen besser ans Ende des Buches gepasst, wo sie wirklich gebraucht werden, statt in Kapitel 3, wo sie inmitten harter Fakten wie Fremdkörper wirken.

Die Kapitel 6 bis 10 erzählen »den Ursprung der Menschheit von der Entstehung der ersten Organismen auf der Erde an«. Diese große Reise von den Wurzeln des »Baums des Lebens« bis zum heutigen Menschen ist der zentrale und geschlossenste Teil des Buches. Sie beginnt mit Carl Woeses ursprünglicher Einteilung des Lebenden in die Reiche der Bakterien, Archaea und Eukaryoten und folgt dann der Ahnenreihe des Menschen, an den Pilzen vorbei zu den Metazoa (Vielzellern), über die Primaten bis zu unseren engsten Verwandten, den Schimpansen. Da es für die nächsten Schritte keine lebenden Arten gibt, erläutern die Autoren zwischendurch das Prinzip der molekularen Uhr und setzen dann die Reise mit den fossilen Frühmenschen bis zum *Homo sapiens* fort.

Auch Genetiker suchen den Sinn des Lebens nicht in den Molekülen

Dieser Teil des Buches überzeugt mich am meisten; trotzdem stören zwei systematische Schwächen. Erstens bleibt der Ursprung des Lebens selbst weitgehend unerwähnt; es ist keine Rede von der Ursuppe, von der RNA-Welt, die der DNA-Welt vorausging, und von Darwins weit vorausschauender Idee, dass alles Leben aus einem einzigen Ereignis hervorging.

Zweitens legen die Autoren übermäßiges Gewicht auf die Frage, ob der moderne Mensch sich vor relativ kurzer Zeit – in den letzten 150 000 Jahren – von Afrika ▷



Gehören die Koboldmakis wegen ihrer insgesamt »primitiven« Merkmale eher zu ihren Verwandten »zur Linken« (Lemurenartige und Loris) oder wegen ihrer schmalen, trockenen, behaarten Nasen zu den Verwandten »zur Rechten«, zu denen auch der Mensch zählt? Nach Klein und Takahata ist die erste, traditionelle Auffassung unhaltbar.

aus über die Welt verbreitet hat oder ob wir von *Homo-erectus*-Populationen abstammen, die bereits vor etwa 2 Millionen Jahren in verschiedenen Kontinenten ansässig waren. Im ersten Fall wären die gegenwärtigen (phänotypischen) Rassenunterschiede in kleinen Gründerpopulationen entstanden und hätten bis jetzt zu wenig (60 000 Jahre) Zeit gehabt, sich wesentlich miteinander zu vermischen; im zweiten Fall wären diese Unterschiede die bescheidenen Überreste weitaus größerer Differenzen unter alten *Homo-erectus*-Populationen, die sich durch interkontinentalen Genaustausch weitgehend angeglichen hätten.

Die Frage ist zwar ein – wohlfeiles – Lieblingsthema der Medien und einiger interdisziplinärer Zeitschriften, aber die Genetiker haben sich im Wesentlichen einhellig für die erste Antwort entschieden und wenden sich interessanteren Fragen zu – was Klein und Takahata auch hätten tun sollen: Stammen die Europäer von neusteinzeitlichen Bauern oder von altsteinzeitlichen Jägern und Sammlern ab? Wurde Polynesien auf einen Schlag oder allmählich besiedelt? Gab es eine voreiszeitliche Einwanderungswelle nach Amerika oder mehrere spätere? Muss man eine separate Wanderungsbewegung von Afrika nach Papua und Australien unterstellen, um die phänotypische Ähnlichkeit der dortigen Ureinwohner mit den Schwarzafrikanern zu erklären?

Im letzten wissenschaftlichen Kapitel kehren die Autoren zu ihrem ureigenen Thema zurück: der Berechnung prähistorischer Populationsgrößen. Noch steckt sie in den Kinderschuhen, wie die Autoren freimütig einräumen. So arbeitet man mit einem – mathematisch wohldefinierten – theoretischen Konstrukt namens »effektive Populationsgröße«, dessen Aussagekraft noch sehr unklar ist. Für den Langzeit-Durchschnitt der effektiven Populationsgröße unserer eigenen, milliardenstarken Spezies ergibt sich mit den gegenwärtigen Modellen der abwegige Wert von 10 000 Individuen. Aber wenn man realistische Parameterwerte und paläoklimatische Daten einbezieht, hat dieser Forschungszweig ohne Zweifel eine Zukunft und ist ein würdiger Abschluss für den wissenschaftlichen Teil des Werkes.

Wer sollte dieses Buch lesen? Meine Studenten auf jeden Fall. Aber entgegen den Hoffnungen der Autoren wage ich zu bezweifeln, ob es in der gegenwärtigen Form einen unentschlossenen Studienanfänger zum Jung-Evolutionsgenetiker machen kann. Nur in den zentralen Kapiteln ist die Begeisterung des Wissenschaftlers zu spüren, der mit neuen Daten und Methoden in unbekanntes Gelände vordringt.

Von dieser Einschränkung abgesehen hat das Buch zurzeit keine ernsthafte Konkurrenz.

Peter Forster

Der Autor ist Chemiker, promovierter Biologe und Research Fellow für molekulare Genetik am McDonald-Institut für Archäologie der Universität Cambridge.

WISSENSCHAFT

Albert Jacquard

Was wir wirklich wissen müssen, um die Welt zu verstehen

Wissenschaft für Nichtwissenschaftler

Aus dem Französischen von Michael Hein.
Rogner & Bernhard bei Zweitausendeins, Hamburg 2002. 240 Seiten, € 14,95

Alles, was man wissen muss, um die Welt zu verstehen, und das auf nur 240 Seiten? Das kann doch nur eine Mogelpackung sein? Ist es auch.

Der Franzose Albert Jacquard, Jahrgang 1925, von Hause aus Genetiker, befasst sich zunächst mit der Definition einiger Begriffe wie »Universum« oder »Zeit« und schildert dann Grundlegendes aus seinem Forschungsschwerpunkt im Schnittfeld von Genetik und Bevölkerungsstatistik. Hier bietet er durchaus hilfreiche Einsichten, etwa indem er die leichtfertige Annahme, die intellektuelle Entwicklung des Kindes sei genetisch völlig vorherbestimmt, kritisch zerpflückt.

Doch wie im ganzen Buch schweift Jacquard immer wieder vom behandelten Thema in gut gemeinte, aber nebulöse Plädoyers für einen besseren Schulunterricht ab – oder in sehr holzschnittartige Ausführungen über Wissenschaft: »Eine wissenschaftliche Haltung einzunehmen bedeutet letztlich, Sinneseindrücke durch Begriffe zu ersetzen und diese Begriffe in Worte zu fassen.« Das ist etwas vage für ein Buch, das »Wissenschaft für Nichtwissenschaftler« bieten möchte, zumal Aspekte wie Experimentieren, Messen, Beobachten oder mathematische Beweise so gut wie gar nicht angesprochen werden.

Der Teil, der sich der Mathematik widmet, ist besonders ärgerlich. Große Teile der Ausführungen über Logarithmen, imaginäre Zahlen und anderes sind

▷ trockene Herleitungen, erschwert durch schlampig oder falsch gesetzte Formeln und kleinere Übersetzungsfehler. Ähnliches gilt für die Abschnitte über Einsteins Relativitätstheorie am Anfang des Buches. Hier ist obendrein die Zielgruppe kaum auszumachen: Welcher Laie ist schon im Umgang mit Differenzialen und trigonometrischen Funktionen geübt?

Das letzte Kapitel »Einige Fragen« ist schließlich so mit guten Absichten überfrachtet, dass es kaum noch etwas Konkretes zu den dort angesprochenen Themen wie »atomare Bedrohung« oder »Menschenwürde angesichts der Gentechnik« bieten kann.

Anscheinend hat der Autor nicht ein Buch geschrieben, sondern mehrere Manuskripte ungeschickt ineinander verschränkt. Dass in dem Buch alles »für den modernen Menschen unerlässliche Wissen … zusammengefasst ist«, wie der Umschlagtext verkündet, davon kann jedenfalls keine Rede sein.

Alexander Pawlak

Der Rezensent ist Diplomphysiker und Redakteur beim »Physik-Journal« in Weinheim.

GEOMETRIE

Leonard Mlodinow

Das Fenster zum Universum

Eine kleine Geschichte der Geometrie

Aus dem Englischen von Carl Freytag.
Campus, Frankfurt am Main 2002. 310 Seiten, € 24,90

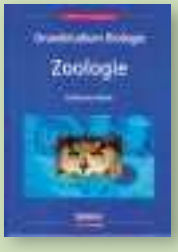
Der Titel ist leicht übertrieben. Der Physiker Leonard Mlodinow, der in Hollywood als Autor für Fernsehserien wie »Star Trek: The Next Generation« arbeitete, spricht von der Geometrie nur insoweit, als sie die Grundlage der Physik ist. Viele interessante Aspekte, etwa die Wechselwirkungen der Geometrie mit der bildenden Kunst, bleiben außen vor. Ein ähnliches Anliegen verfolgte schon 1969 Max Jammer in seinem Klassiker »The Concept of Space« – im Unterschied zum vorliegenden Buch allerdings in streng wissenschaftlicher Weise. Merkwürdigerweise erwähnt Mlodinow diese wichtige Quelle an keiner Stelle.

Der erste Teil des Buches schildert die Vor- und Frühgeschichte der Geometrie von den ägyptischen Seilspannern über Thales und Pythagoras bis hin zu Euklid und dessen Parallelenpostulat (heute Parallelenaxiom genannt). Ob allerdings Euklid »selbst dieses Postulat nicht sonderlich schätzte«, wie Mlodinov behauptet, oder ob er dessen systematische Rolle bei der Abfassung seiner »Elemente« erkannte, das wird man wohl mangels Quellen kaum jemals klären können.

Es zeigt sich hier schon ein Zug, der dem ganzen Buch zu eigen ist: Für eine gute Pointe ist der Autor allzu leicht bereit, die historische Wahrheit zu vernachlässigen. Nach Euklid geht Mlodinov, nachdem er ausführlich die ihm offenkundig unsympathische Finsternis des Mittelalters gewürdigt hat, auf Nikolas Oresme (um 1320–1382) und seine Qualitätenlehre ein. Der große Fortschritt ist dann die Koordinatenmethode des René Descartes (1596–1650), die unabhängig und von unserem Standpunkt aus ausgereifter auch Pierre de Fermat (1601–1665) gefunden hat. Deren Grundideen werden leicht verständlich dargelegt – allerdings wieder weit ab der historischen Wahrheit: So gab es bei Descartes keine Geraden- und Kreisgleichungen in der Art, wie das Buch sie ihm zuschreibt. Geschickt wird die Mathematikgeschichte verwoben mit Informationen zu Descartes' Leben und seiner Zeit.

Der zweite Teil ist stark von der Physik geprägt. Am Anfang steht Carl Friedrich Gauß (1777–1855) mit seinen Ideen zur nichteuklidischen Geometrie und zur Differenzialgeometrie. Da Mlodinow mehr auf große Helden aus ist, erwähnt er nur kurz János Bolyai und Nikolai Lobatschewski, die unabhängig von Gauß die nichteuklidischen Geometrien entdeckten, und spielt deren Verdienste noch unzulässig herunter, indem er längst widerlegte Zweifel an ihrer Eigenständigkeit wieder aufwärmt. Weitere Ausführungen über die nichteuklidischen Geometrien befassen sich mit den bahnbrechenden Werken von Bernhard Riemann (1826–1866) und Henri Poincaré (1854–1912). ▷

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Katharina Munk (Hg.)

Zoologie

Grundstudium Biologie

Spektrum Akademischer Verlag 2002, 702 Seiten, € 49,95

Das Werk erhebt den Anspruch, den gesamten Stoff des Grundstudiums Biologie auf dem Gebiet der Zoologie abzudecken und prüfungsrelevantes Wissen zu vermitteln. Tatsächlich bietet es einen ziemlich umfassenden Überblick, sowohl der klassischeren als auch der aktuelleren Bereiche.

Aber diese Stofffülle hat ihren Preis. Im Gegensatz zu manchem amerikanischen Lehrbuch müssen die Texte wegen der hohen Informationsdichte sehr gründlich durchgearbeitet werden.

Kann man sich auf die Vordiplomsprüfungen in Zoologie an einer deutschen Universität ausschließlich mit diesem Buch vorbereiten? Die Antwort ist ein vorsichtiges »Ja« – allerdings nur in Kombination mit einschlägigen Vorlesungen.

Aus der Rezension von Harald Luksch

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Didaktik	■■■
Suchen/Finden	■■■■
Lesespaß	■■
Preis/Leistung	■■■■
Gesamtpunktzahl	18

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/5x5

Schließlich erfahren wir einiges über Einstein und seine Relativitätstheorie sowie über moderne Theorien wie die String-, die Superstring- und die M-Theorie (Spektrum der Wissenschaft 10/1999, S. 14). Auch hier gibt es natürlich Helden, besonders John Schwarz und Edward Witten, und sie rücken immer mehr in den Vordergrund. Es versteht sich von selbst, dass technische Einzelheiten und fundierte Informationen bei diesem Thema immer seltener werden; ob der Leser allerdings mehr als eine vage Idee mitnimmt, wage ich zu bezweifeln.

Das Buch ist flott geschrieben und leicht, vielleicht sogar amüsant zu lesen. Leider bemüht sich der Autor nie, die Qualität seiner Informationen für den Leser deutlich zu machen: Reine Spekulationen, einleuchtende Interpretationen, bekannte Tatsachen und Anekdoten werden bunt gemischt zu einer munteren Hagiografie der Größten. Fundierte und kritische Informationen sollte man hier ebenso viel erwarten wie in einem Hollywood-Film; es fällt auf, dass der Autor so gut wie nie auf die Quellen zurückgeht, sondern meist sein Wissen aus Sekundärliteratur schöpft.

Es bleibt eine lebendige und kurzweilige Geschichte, bei der man nicht alles als bare Münze nehmen darf.

Klaus Volkert

Der Rezensent ist Professor für Didaktik und Geschichte der Mathematik an der Universität Frankfurt am Main.

KULTURGESCHICHTE

Rupert Riedl

Riedls Kulturgeschichte der Evolutionstheorie

Die Helden, ihre Irrungen und Einsichten

Springer, Heidelberg 2003. 236 Seiten, € 27,99

Die Theorie von der Evolution der Lebensformen, von der Veränderlichkeit der Arten, ist eine große Idee, die auf die Dauer die Welt mehr und nachhaltiger verändert hat als Kriege und Staatenlenker. In seinem neuen Werk folgt der Wiener Zoologe Rupert Riedl (Jahrgang 1925) der Spur ihrer Entwicklung, von ihren tastenden Anfängen über die breite Schneise der weltanschaulichen Entzweiung bis zur heutigen – zumindest in unserem aufgeklärten Kulturraum – unaufgeregten Selbstverständlichkeit.

Es ist dies kein Lehrbuch der Evolutionsbiologie; das überwältigende Beweismaterial, das sich zum Beleg der großen synthetischen Theorie Charles Darwins angesammelt hat, ist dem Autor nur Mittel zum Zweck und wird daher auch nur skizzenhaft gestreift. Wer Riedl durch sein Argumentationsgebäude folgen will, benötigt eine noch einigermaßen erhaltene Erinnerung an einen ordentlichen Biologieunterricht.

Es ist dies – entgegen dem Titel – aber auch kein wissenschaftshistorisches Werk. Die konsistente Formulierung der Evolutionstheorie erfolgte um die Mitte des an wissenschaftlichen Durchbrüchen und tiefen Einsichten nicht eben armen 19. Jahrhunderts. Warum gerade dann? Die erkennende, aber noch nicht erklärende Antwort – diesen Unterschied stellt Riedl ins Zentrum seiner erkenntnistheoretischen Exkursion – ist, dass die Zeit dafür reif war.

Ungefähr zur selben Zeit, als Darwin sein epochales Werk von der Entstehung der Arten verfasste, schuf sein Landsmann James Clerk Maxwell die erste große vereinheitlichende Theorie der Physik in seiner Lehre vom Elektromagnetismus. Ebenfalls um die gleiche Zeit entstand in den Köpfen und Notizbüchern der Chemiker Julius Meyer und Dimitrij Mendelejew das Periodensystem der Elemente, das große, ordnende Prinzip der Wissenschaft von den Stoffen und deren Änderungen. Die Zeit des »Schmetterlingesammelns« war vorbei, die Zeit, Bilanz zu ziehen und nach dem gemeinsamen Nenner zu suchen, war allenthalben angebrochen.

Ebenso wie Newton auf Kepler und Maxwell auf Faraday aufbauen konnte, hatte auch Darwin Vorläufer und -arbeiter. Ihnen zollt Riedl Tribut, ordnet ihre Beiträge ein. Aber erst Darwin gelang auf seiner fünfjährigen Odyssee auf den Weltmeeren, die ihm seine Abenteuerlust mit ▷

PHYSIK

Len Fisher

Reise zum Mittelpunkt des Frühstückseis

Streifzüge durch die Physik der alltäglichen Dinge

Aus dem Englischen von Carl Freytag.
Campus, Frankfurt am Main 2003. 290 Seiten, € 21,50

Warum kann ich die widerspenstige Schraube mit einem langen Schraubenzieher besser in die Wand drehen als mit einem kurzen? Der Hebelarm, an dem meine Kraft angreift, ist nicht länger – sollte man meinen. Der englische Physiker Len Fisher belehrt mich eines Besseren. Das, wovon einem eigentlich abgeraten wird, nämlich den Schraubenzieher zu verkanten: Das bringt die zusätzliche Kraft.

Das Buch bringt Merkwürdiges und Scherzhaftes zu alltäglichen Dingen, zum Beispiel zu einem schnellen und effizienten Verfahren, den Kassenzettel des Supermarkts durch Überschlagsrechnung zu überprüfen, zur Kunst, einen Ball im Laufen zu fangen, zum Schicksal des Kekses im Tee und des Frühstückseis im kochenden Wasser, und zum Schluss ein ausführliches Kapitel über »Physik und Sex«. Die lustvollen Passagen weichen allerdings bald einer ermüdenden Darstellung von dem ermüdenden Hindernislauf, den die Spermien nach vollzogenem Akt zu absolvieren haben.

Gegen die Fülle interessanter Einzelheiten ist nichts einzuwenden – ganz im Gegenteil. Bis Fisher allerdings ein Versprechen vom Anfang des Kapitels am Ende einlöst, hat er mit sehr vielen Nebenbemerkungen die Geduld des Lesers sehr strapaziert.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

nie nachlassender Seekrankheit heimzahlten, die Anhäufung einer »kritischen Masse«, die zur Zündung gebracht werden konnte.

Nach der Zelltheorie des 17. Jahrhunderts war die Evolutionstheorie die nächste Stufe der Vereinheitlichung in der Biologie. Darwin und seine Adepten – unter ihnen so entschiedene Streiter und Verbreiter seiner Lehren wie Thomas Huxley und Ernst Haeckel – erkannten, dass man hier auf eine tiefe, allgemeine Einsicht gestoßen war. Man erkannte, aber man war nicht – noch nicht! – in der Lage zu erklären. Das gelang erst im späteren 20. Jahrhundert mithilfe der Genetik, einer Theorie von ähnlicher Tragweite, die aber erst das Licht der Welt erblicken und sich ihre Sporen in der experimentierenden Beweisführung verdienen musste. Darwin und Huxley – der wohl zumindest – hätten ihre Freude gehabt.

Riedl folgt in seiner Darstellung der Chronologie der Ereignisse, aber sein Ansatz ist nicht wahrhaft historisierend, sondern entschieden philosophierend. Seine »Kulturgeschichte der Evolutionstheorie« ist mehr Ideengeschichte als Wissenschaftsgeschichte, wiewohl beides untrennbar vermengt ist, denn erst eine standfeste Erkenntnistheorie gibt einem die Möglichkeit, tatsächlichen Sinn aus gemachter Beobachtung zu machen. Riedl selbst hatte als Systemtheoretiker Anteil an der Entwicklung der Theorie, die er beschreibt, und so macht sein Bericht an mehr als einer Stelle den Eindruck eines Resümees. Ein aktiv Beteiligter zieht Bilanz zu einer Zeit, da die einstmals so hohe Wellen schlagende Theorie geistiges Allgemeingut einer gebildeten Gesellschaft geworden ist.

Noch immer wird versucht, die Frucht der Erkenntnis ungenießbar zu machen

Aber die Kulturgeschichte der Evolutionstheorie ist noch nicht zu Ende geschrieben. Der Kampf der Erkennenden um die Anerkennung des erklärten Erklärlichen ist nicht an allen Fronten gewonnen. Noch immer herrscht in allzu vielen Teilen der Welt das finstere, das mittlere Alter; noch immer versucht in einigen Staaten des amerikanischen Mittelwestens die geistige Sittenpolizei, die verbotene Frucht der Erkenntnis ungenießbar zu machen, wenn sie ihren Verzehr schon nicht verhindern kann. Riedls Abriss ist ein Zwischenbericht, den jeder lesen sollte, der Biologie zu unterrichten hat.

Wer den Autor von seinen anderen Werken kennt, weiß, dass sein bisweilen enigmatischer Stil dem geneigten Leser einiges abverlangt. Einem Autor, der wie Riedl auf der Grenze zwischen Naturwissenschaft und Philosophie wandelt, mag das erlaubt sein. Schließlich ist das, was er rekapituliert, nichts weniger als eine der größten Leistungen menschlichen Intellekts, der vielleicht größte Schritt in der Geschichte des menschlichen Selbsterkennens, die endgültige Abkehr vom Anthropozentrismus vergangener Zeiten.

Thomas Lazar

Der Rezensent hat in Biologie promoviert und ist freischaffender Sachbuchautor und Übersetzer in Göttingen.

GEOLOGIE UND ZEITGESCHICHTE

Colin J. Campbell, Frauke Liesenborghs, Jörg Schindler und Werner Zittel

Ölwechsel!

Das Ende des Erdölzeitalters und die Weichenstellung für die Zukunft

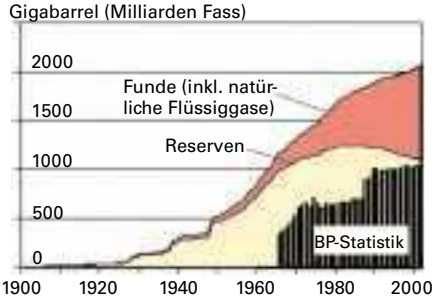
Deutscher Taschenbuch Verlag, München 2002. 260 Seiten, € 15,–

Der dritte Golfkrieg ist inzwischen vorüber. Aber selbst wenn sich im Irak in nächster Zeit eine einigermaßen stabile Nachkriegsordnung einstellen sollte, wird der Nahe Osten weiter ein Unruheherd der Erde bleiben, vom Palästinenserkonflikt über das Kurdenproblem bis zu fundamentalistischen Tendenzen in Saudi-Arabien. Das vorliegende Buch, das von der Umweltorganisation »Global Challenges Network« herausgegeben wird, gibt ein differenziertes Bild von den Wurzeln dieser Konflikte und von der Rolle des Erdöls in diesem Zusammenhang.

Der erste, geologische Teil des Buches ist eine ermüdende Geduldsprobe. Nichts gegen allgemeine Informationen über Entstehung und Ausbeutung von Erdöl- und Erdgaslagerstätten; aber die so umständlich ausgebreiteten Daten zu jedem einzelnen Land hätten, grafisch aufbereitet, mühelos auf zwanzig statt reichlich hundert Seiten Platz gefunden.

Der zweite Teil ist ein spannend geschriebener geschichtlicher Abriss. Von Anfang an war die Politik in der Golfregion untrennbar mit dem Öl verbunden und von Chaos, Anarchie, Eigensinn und Zufällen geprägt. Akteure waren zunächst noch das Deutsche und das Osmanische Reich, zu dem die meisten Gebiete der Region vor dem Ersten Weltkrieg gehörten. Es waren deutsche Ingenieure, die 1903 bei Vermessungsarbeiten für die geplante Bahnlinie nach Bagdad auf Ölsickerstellen stießen. Nach 1918 teilten sich England und Frankreich die Region untereinander auf. Die wichtigste britische »Mandatsneuschöpfung« war der Irak, ein künstliches Gebilde aus verschiedenen Volksstämmen, dessen Grenzen von den Verhandlungspartnern in Paris mit dem Lineal gezogen wurden. Diese Willkür diente Saddam Hussein 1991 als Rechtfertigung für sein Vorhaben, mit Kuwait »eine irakische Provinz« in Besitz zu nehmen.

Nach dem Ersten Weltkrieg geriet die arabische Welt zunehmend in den Fokus der Weltpolitik, da sich Rohöl nicht nur für industrielle, sondern auch für kriegerische Zwecke als unentbehrlich herausstellte. Mittlerweile spielten auch die USA im Ölpoker mit. Der Kaufmann John D. Rockefeller schuf sich ein Imperium und bestimmte lange Zeit die inneramerikanische Ölpolitik. Die Autoren beschäftigen sich auch mit anderen Einzelpersonen wie dem Armenier Gulben-



Summenkurve der weltweiten Ölfunde und historische Entwicklung der bekannten Ölreserven

▷ kian, dem Neuseeländer Major Frank Holmes oder dem lokalen Stammesführer Ibn Saud von Saudi-Arabien, die die Ölgeschichte des Mittleren Ostens entscheidend mitgeprägt haben. Diese Verknüpfung von großer Weltpolitik mit kaum bekannten Persönlichkeiten, die hinter der Bühne die Fäden zogen, ist ungemein gut gelungen.

Noch in den 1960er Jahren dominierten die »Sieben Schwestern«, die sieben größten Ölkonzerne, den Ölmarkt. Durch das Überangebot sanken die Preise, die Konzerne wälzten die Preissenkungen einfach auf die Förderländer ab. Als Reaktion darauf schlossen sich zahlreiche Förderländer zur OPEC zusammen; deren koordinierte Preispolitik löste 1973 die erste Ölkrise aus.

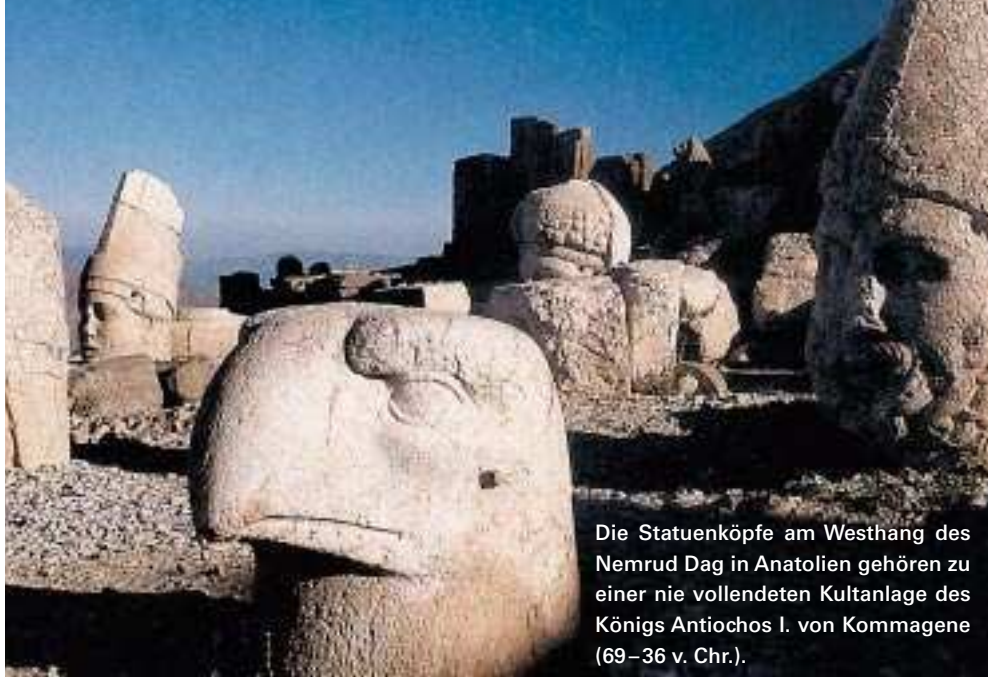
»Ölwechsel!« verrät uns auch, warum die Politik und die Industrie bei der Reservenabschätzung der Ölvorkommen unterschiedlich vorgehen. Manche Staaten wie Großbritannien untertreiben, andere wiederum übertreiben. So erhöhte Kuweit 1985 seine Schätzung um fünzig Prozent – das entspricht den gesamten Nordseereserven. Der Grund: Man wollte eine Erhöhung der eigenen OPEC-Quote, sehr zum Unwillen des Irak.

Im letzten Kapitel konzentrieren sich die Autoren auf die Aspekte Ökologie und Nachhaltigkeit und fordern die Überwindung der Wachstumsideologie. In begrenzten Systemen kann es kein ewiges Mengenwachstum geben. Nach dem Prinzip der Nachhaltigkeit darf die Nutzung einer Ressource nicht größer sein als ihre Regenerationsrate, die Freisetzung von Stoffen nicht größer als die Aufnahmefähigkeit der Umwelt. Erneuerbare Ressourcen wie Solar- und Windenergie müssen langfristig ein Ersatz sein. Grafiken und Tabellen sind hier leider ebenso unansehnlich wie am Beginn des Buches, teilweise auch fehlerhaft: Rechnet man die Angaben zur Gesamt-Sonnenkollektorfläche auf Seite 144 nach, dann kommt man auf 78 statt 8 Millionen Einwohner für Österreich. Griechenland hätte gar 173 Millionen statt knapp über 10.

Gleichwohl: Wer über kleine Fehler und den langatmigen geologischen Teil hinwegsieht, findet überaus interessante geschichtliche und wirtschaftliche Informationen, die gerade die aktuelle politische Situation besser verstehen helfen.

Gunther Jauk

Der Rezensent ist Diplomgeograf und Wissenschaftsjournalist in Graz.



Die Statuenköpfe am Westhang des Nemrud Dag in Anatolien gehören zu einer nie vollendeten Kultanlage des Königs Antiochos I. von Kommagene (69–36 v. Chr.).

ARCHÄOLOGIE

Wolfgang Korn

50 Klassiker – Archäologie

Die wichtigsten Fundorte und Ausgrabungsstätten

Gerstenberg, Hildesheim 2003. 288 Seiten, € 19,95

Dies ist ein Reiseführer der etwas anderen Art. Mit viel Liebe zum Detail beschreibt der Wissenschaftsjournalist Wolfgang Korn insgesamt 49 archäologische Stätten rund um die Welt, von den Höhlen von Lascaux über Pompeji und die Pyramiden von Gizeh bis zur Inkastadt Machu Picchu. Die Fotos sind so schön, dass man am liebsten selbst dort hinreisen möchte.

Korn erweist sich als kundiger Führer, nur selten erliegt der Journalist dem Reiz der Spekulation: »Nicht zufällig kommen uns die Bilder von Lascaux vor, als seien sie Träumen entsprungen, denn es sind visionäre Erfahrungen.« Das mag sein, wird sich aber nie beweisen lassen. Eine journalistische Tugend hingegen ist der Mut zum offenen Wort, zum Beispiel zum Jerusalemer Tempelberg. Der habe archäologisch wenig zu bieten, konstatiert der Autor, weil die konkurrierenden Glaubensgemeinschaften jegliche archäologische Erforschung blockieren. Eine Freiheit, die sich der Fachmann ebenfalls kaum erlauben würde: Zum Abschluss des Reiseführers erklärt Korn die Historie des Atlantis-Mythos kühn zur virtuellen fünfzigsten Grabungsstätte – und liefert eine nüchterne Zusammenfassung.

Jedem Kapitel widmet das Buch vier bis sechs Seiten. Einem Sachtitel – »Pfahlbausiedlung am Federsee« – mit feuilletonistischem Untertitel – »Troia im Moor« – folgt der Haupttext mit einer kurzen Darstellung des historischen Kontextes sowie einer Beschreibung der Sehenswürdigkeiten. Auf der letzten Seite eines Kapitels hat der Autor die Forschungsgeschichte zusammengetragen: Wer hat wann zum heutigen Erkenntnisstand über diesen Grabungsplatz beigetragen? Eine ungewöhnliche und bereichernde Information.

Weitere Elemente sind teilweise verwirrend. Den Haupttext eines Kapitels ergänzen Zitate und Stichwörter wie »Megalithkulturen« oder »Die ionische Säule«, sie wurden aber grafisch nicht einheitlich gehandhabt. Die letzte Kapitelseite nennt nicht nur Literaturtipps und Weblinks, sondern auch unter »Wissenswertes« weitere Informationen, doch ein System dahinter ist nicht erkennbar. »Auf den Punkt gebracht« sollte wohl eine Essenz des Kapitels liefern, herausgekommen sind eher banale Aussagen wie »Die Mischung aus Original und Spekulation gewährt einen spannenden Blick in die sonst fremde Welt der Minoer«.

Begriffs-, Orts- und Namensregister runden den empfehlenswerten Reiseführer ab. ◁

Klaus-Dieter Linsmeier

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Von Aaskäfern bis Zuckmücken

Nicht jede der 1,2 Millionen Insektenarten ist im World Wide Web vertreten; aber die Vielfalt des Materials ist beachtlich.

Von Nardine Löser

Der Insektenforscher Jean-Henri Fabre antwortete auf die Frage nach seinem Gottesglauben: »Ich glaube nicht an ihn, ich sehe ihn in der Natur.« Fabre musste noch lange Vorbereitung, Geduld und nasse Füße in Kauf nehmen, um die wahrhaft Ehrfurcht erregende, im Kleinen verborgene Schönheit der Insekten erfassen zu können. Unsereins kann sich – bei bescheideneren Qualitätsansprüchen – sogar die Anschaffung eines Bildbandes ersparen. Unter http://nafoku.de/insekten/ hat die Fotoamateurin Sabine Jelinek eine reiche Auswahl ins Netz gestellt: vom Landkärtchen-Falter im Mooswald bis zur quergestreiften Quelljungfer.

Mit 1,2 Millionen – nach Hochrechnungen möglicherweise sogar 10 bis 30 Millionen – Arten bilden die Insekten die größte Gruppe im Tierreich. Ihre Einteilung in Ordnungen, Familien und Gattungen ist nicht einfach. Wichtigstes Kriterium waren 1868 die Mundwerkzeuge – so die »Natürliche Schöpfungsgeschichte« Ernst Haeckels (http://caliban.mpiz-koeln.mpg.de/~stueber/haeckel/natuerliche/Seite_432.jpg). Heute sind die Entomologen (Insektenkundler) zwar darüber hinaus, stechende und schlürfende Insekten zu den »Saugern« und beißende und leckende zu den »Kauern« zu sortieren. Aber ihre Arbeit ist noch längst nicht erledigt. Die deutsche Website www.faunistik.net/DETINVERT/_ORDERS/insect_orders.html stellt, der klassischen Taxonomie folgend, die Entognatha (Springschwänze, Beintaster und Doppelschwänze) zu den Insekten. Dagegen vertritt der »Tree of life« eine andere Auffassung (http://tolweb.org/tree?group=Hexapoda&contgroup=Arthropoda). Dieses groß angelegte Web-Projekt sucht buchstäblich alle bekannten, lebenden wie ausgestorbenen, Arten zu klassifizieren. Mit langen Literaturlisten begründen zahlreiche Wissenschaftler, warum sie die Äste vom »Baum des Lebens« so und nicht anders anordnen. Insbesondere sortieren sie die Entognatha wegen der verkümmerten Komplexaugen nicht zu den Insekten, aber immerhin noch, mit diesen, zu den »Hexapoda« (Sechsfüßern).

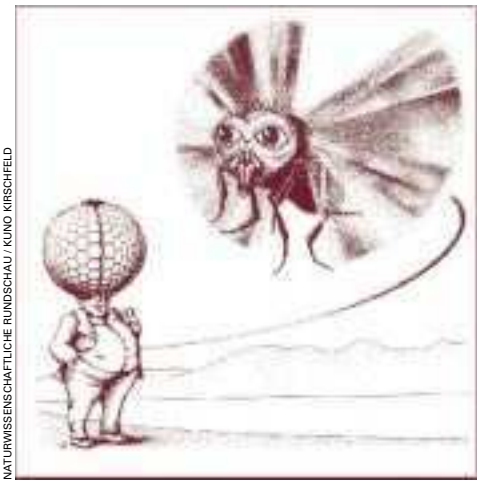
Besonders viele Websites widmen sich dem Nervensystem und den Sinnesorganen, die bei der Besetzung der ökologischen Nischen durch Insekten von großer Bedeutung waren. Die sehr anschauliche deutsche Seite www.merian.fr.bw.schule.de/Beck/skripten/12/bs12-45.htm macht deutlich, dass Rundumsehen und Auflösungsvermögen in der Nähe – ermöglicht durch das für Insekten typische Komplexauge – enorme Vorteile bringen. Aufgrund ihrer Fähigkeit, Bildwechsel extrem rasch wahrzunehmen, sind Fliegen sehr reaktionsschnell. Es ist also kein Wunder, dass wir sie so selten zu fassen kriegen.

Nur wenige Adressen weiter erweisen sich Insekten als wichtige Nützlinge. So erfahren Interessierte von dem entscheidenden Beitrag der Sechsbeiner zur Fortpflanzung von Blütenpflanzen (http://members.aon.at/s.pfeiffer/insekten.htm) oder können per virtuellem Filmbeitrag die Tanzsprache der Bienen erlernen (Rubrik »Natur und Technik« unter www.planet-wissen.de).

Die Website des Kriminalbiologen Mark Benecke (www.benecke.com) schildert unter anderem im Detail die Besiedlung einer Leiche durch Insekten (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 42). Nichts für schwache Nerven!

Zu guter Letzt: Um Ihnen die Scheu vor den Insekten zu nehmen und auf ihre Bedeutung im Naturhaushalt aufmerksam zu machen, wählt das Deutsche Entomologische Institut seit 1999 das Insekt des Jahres (http://www.zalf.de/deid/insekt03/INDEX.HTM). Für 2003 ist es ein echter Europäer: die Feldgrille. ◁

Die Autorin ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Berlin.



NATURWISSENSCHAFTLICHE RUNDSCHAU / KUNO KIRSCHFELD

Mensch und Fliege tauschen ihre Augen. Für den Menschen wäre die gewohnte Sehschärfe nur mit einem metergroßen Komplexauge zu realisieren (www.sinnesphysiologie.de/komplex/eyesize. htm).

Über mehrere Mausklicks (»Insekten«, »Morphologie« und andere) führt www.faunistik.net auch zum Komplexauge der Insekten.

MONIKA UND RICHARD FELLINGER

GABRIELA EINENKEL

Wenn die Äpfel sich nicht auseinander blasen lassen, braucht man mehr Puste, oder?

AERODYNAMIK

Angezogene Äpfel und aufdringliche Duschvorhänge

Wenn ein Blasrohr eine Postkarte ansaugt, statt sie wegzublasen, oder der Duschvorhang einwärts weht, dann hat – in Gestalt der Bernoulli'schen Gleichung – der Energiesatz seine Hände im Spiel.

Von Wolfgang Bürger

Zum Kindergeburtstag hatte sich unser Geburtstagskind ein ganzes Rudel Schulfreunde eingeladen. Vor einem Fenster hängten wir an langen Fäden zwei schöne rotbackige Äpfel auf, nahe nebeneinander, aber doch weit genug, dass durch den Luftspalt zwischen ihnen noch das Tageslicht zu sehen war. »Wer von euch«, fragten wir in die Runde, »traut sich zu, die Äpfel auseinander zu blasen?« Jeder wollte der Erste sein, dem das Kunststück gelang. Aber so oft es der eine oder andere versuchte, es geschah nicht, was die Kinder erwartet hatten, sondern das Gegenteil – wie magnetisch zogen sich die Äpfel im Luftstrahl an und prallten zusammen. Bei den Kindern dauerte die Ratlosigkeit nicht lange, aber (was schon Antoine de Saint-Exupérys »Kleiner Prinz« wusste) die Erwachsenen brauchen Erklärungen …

In dem Luftstrahl, den die Kinder mit der Kraft ihrer Lungen durch den engen Spalt pusten, nimmt der Luftdruck ab. Der größere Druck der ruhenden Luft an den Außenseiten der Äpfel kann sie dann aufeinander zu bewegen. Innerhalb der Strömung sinkt der Druck der Luft im selben Maße, in dem ihre Bewegungsenergie (pro Volumeneinheit) wächst – eine Spielart des Satzes von der Erhaltung der Energie, die in der Hydrodynamik »Bernoulli'sche Gleichung« heißt. Nur in einer sehr dünnen »Grenzschicht« an der Oberfläche der Äpfel spielt die innere Reibung der Luft eine nennenswerte Rolle.

Ein schlechtes Blasinstrument: Sobald die beiden Äpfel sich berühren, unterbrechen sie den Luftstrom durch den Spalt fast völlig, und im nächsten Augenblick werden sie von der auftreffenden Luft tatsächlich auseinander geblasen. Sie schwingen als Schwerependel zurück, verlieren aber wohl beim Aufprall zu viel Energie, um ständig weiterschwingen zu können. Eine weniger gewichtige Postkarte lässt sich jedoch mit einem Blasrohr (von, zum Beispiel, 25 cm Länge und 8 mm Innendurchmesser) mit einer ebenen Abströmscheibe (von 12 cm Durchmesser) an seinem Ende zu einer Schwingung anregen, die zwar nicht sichtbar, aber hörbar ist. Hält man das Blasrohr ein paar Millimeter über die Postkarte und bläst kräftig in das Mundstück des Rohrs, versucht der in der Mitte auftreffende Luftstrahl zwar, die Postkarte von der Endscheibe wegzudrücken, aber außen saugt der Unterdruck der radialen Strömung sie im Luftspalt an. Überwiegt der Sog den Druck, wird sie angehoben, bis sie die Öffnung verschließt und den Luftstrom unterbricht; dann fällt sie wieder ab. Hat der Bläser aber genügend langen Atem, kommt sie nicht weit und wird erneut angesogen. Das geschieht einige hundert Mal in der Sekunde, nach der Tonhöhe des schauerlichen Geräuschs zu urteilen, das die Luft zwischen Scheibe und Postkarte von sich gibt. Auch leichteres Papier lässt sich zum Schwingen bringen, und anstelle eines professionellen Blasrohrs tut es auch eine einfache Garnrolle. Die Methode der Schallerzeugung ähnelt der in Holzblasinstrumenten wie Oboen und Klarinetten, die es besser können, und der Kunst, auf einem Grashalm zu pfeifen (siehe Kasten rechts).

Der Duschvorhang: Duschkabinen sind selten groß genug für ausgewachsene Menschen. Bei der Einrichtung des nächsten Bades werde ich, wenn nicht eine Kabine mit festen Wänden, eine Duschwanne von mindestens 100 × 100 Zentimeter (statt der üblichen 80 × 80) vorsehen. Das sind nur zwanzig Zentimeter mehr in beiden Raumrichtungen, die aber 56 Prozent mehr Grundfläche bringen! Die Enge in der Dusche wäre erträglich, wenn ich die Dusche für mich allein hätte. Aber kaum drehe ich warmes Wasser auf, kommt mir der Duschvorhang entgegen. Statt des warmen Wassers, das den Körper streichelt, klebt jetzt kaltes PVC an Armen oder Beinen. Woran liegt das? Hypothesen sind leicht gemacht, aber klar ist vorerst nur, was wir sehen: Offensichtlich herrscht bei laufender Dusche im Inneren der Duschzelle niedrigerer Druck als außen. Bei der großen Fläche des Vorhangs kann schon ein kleiner Druckunterschied eine Kraft erzeugen, die einen nicht zu schweren Vorhang nach innen drückt.

An einer Technischen Universität gibt es Spezialisten für alles, was mit Technik zu tun hat, ob im Haushalt oder in der Industrie. Um Genaueres zu erfahren, rief ich deshalb meinen geschätzten

Kollegen von der Thermischen Verfahrenstechnik an, der für meine Frage zuständig sein sollte, weil er sich dienstlich mit Geschirrspülern und Wäschetrocknern, mit Kaffeemaschinen und (wie ich hoffte) Duschen beschäftigte. »Das Problem mit der Dusche kenne ich«, antwortete der Kollege am anderen Ende der Telefonleitung, »aber ich habe noch nicht darüber nachgedacht. Ich klebe den Vorhang immer mit ein bisschen Wasser unten an der Duschwanne an«.

In dem darauf folgenden Gespräch konnten wir zwar das Problem nicht quantitativ lösen, aber wenigstens grundsätzlich klären, warum es keinen großen Unterschied bedeutet, ob warm oder kalt geduscht wird. Luft wird nämlich nicht nur leichter, wenn sie wärmer, sondern auch, wenn sie feuchter wird. Wussten Sie das? In feuchter Luft verdrängt Wasserdampf, ein unsichtbares Gas (nicht zu verwechseln mit dem Nebel, der aus kleinen schwebenden Tröpfchen flüssigen Wassers besteht) einen Teil der trockenen Luft. Während diese, im Wesentlichen ein Gemisch aus etwa achtzig Prozent Stickstoff N_2 und zwanzig Prozent Sauerstoff O_2, ein Molgewicht von etwa 29 Gramm hat, beträgt für Wasserdampf ▷

Strömung erzeugt Unterdruck

Das Blasrohr: Der vertikale Luftstrom aus dem Blasrohr wird von der Postkarte zu einer radialen Strömung im Zwischenraum zwischen ihr und der Abströmplatte umgelenkt. Wir betrachten eine stationäre Strömung, das heißt, durch jeden Querschnitt des Rohrs strömen pro Sekunde so viel Liter Luft, wie der Bläser am oberen Ende in das Rohr einspeist. Der gleiche Volumenstrom Q durchsetzt auch jedes gedachte, sehr schmale Band, das, kreisförmig mit Radius r in den Luftspalt zwischen Postkarte und Abströmscheibe gelegt, diesen verschließen würde. Aus der Konstanz von Q kann man die Geschwindigkeit der Luft an den verschiedenen Stellen des Systems herleiten; denn bei diesen insgesamt niedrigen Geschwindigkeiten behält auch ein leicht zusammendrückbares Gas wie Luft seine Dichte ρ bei.

Im Rohr mit dem Radius a beträgt die Geschwindigkeit der Luft, über den Rohrquerschnitt gemittelt, $v_a = Q/(\pi a^2)$. Damit transportiert die Luft einen Impulsstrom $F_D = \rho v_a Q = \rho Q^2/(\pi a^2)$. Das ist die Druckkraft, mit der die Luft die Postkarte zu Boden zu drücken versucht, und zugleich die Gegenkraft, mit der die Postkarte den Luftstrom in die Horizontale umlenkt.

Im Luftspalt hat die Radialströmung beim Radius r, gemittelt über die Höhe h des Luftspalts, die Geschwindigkeit $v(r) = Q/(2\pi r h)$ (Volumenstrom durch Fläche des – sehr niedrigen – Zylindermantels). Sie erzeugt den Unterdruck $p(r) = -\rho v^2(r)/2 = -\rho Q^2/(8\pi^2 r^2 h^2)$. (Die Formel ist nicht exakt; am Rand R der Abströmplatte wird der Unterdruck null.) Integriert über die Fläche der Scheibe zwischen $r = a$ und $r = R$ ergibt dieser Druck die Saugkraft

$$F_S = \frac{-\rho Q^2}{4\pi h^2} \ln \frac{R}{a} .$$

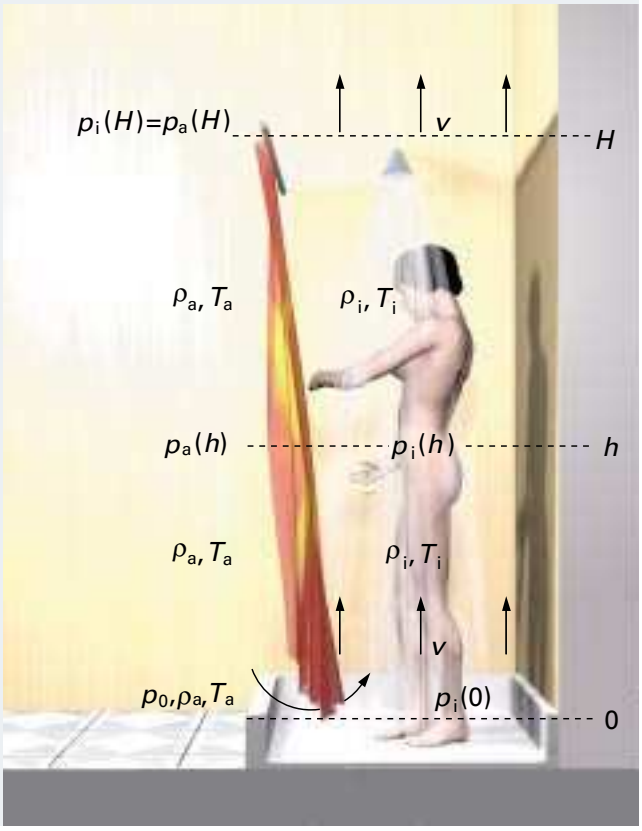
Die Gesamtkraft der Luft auf die Postkarte ist

$$F = F_D + F_S = \frac{\rho Q^2}{4\pi h^2} \left(\left(\frac{2h}{a} \right)^2 - \ln \frac{R}{a} \right) .$$

Bei negativem F wird die Postkarte angesogen.

Für mein bevorzugtes Blasrohr ($a = 4$ mm, $R = 6$ cm) errechnet man bei der Luftdichte $\rho = 1{,}29$ kg/m^3, dem geschätzten Abstand $h = 0{,}2$ mm und dem Volumenstrom $Q = 0{,}2$ Liter pro Sekunde eine Kraft von $F = -0{,}27$ Newton oder 26 Pond, die eine Postkarte von 4 Pond Gewicht leicht in Bewegung versetzen kann.

Unterdruck in der Dusche: Die Temperatur T_i innerhalb der Duschzelle ist höher als die Temperatur T_a außerhalb. Deshalb und wegen des höheren Wasserdampfgehalts ist die Dichte der Luft innen geringer als außen: $\rho_i < \rho_0$. Innen wie außen ist der Luftdruck eine lineare Funktion der Höhe h, denn Duschräume sind sehr niedrig im Vergleich zur Höhe der Atmosphäre. Außen ist der Druck hydrostatisch: $p_a(h) = p_0 - \rho_0 g h$. Im Innern der Duschzelle erfüllt er, reibungsfreie Strömung vorausgesetzt, die Bernoulli'sche Gleichung: $p_i(h) = p_0 - \rho_i g h - \rho_i v^2/2$. Beim Einströmen von unten ($h = 0$) wird der Druck des Gases um den Betrag kleiner, um den seine kinetische Energie pro Volumen wächst, wenn es auf die Geschwindigkeit v beschleunigt wird. Beim Ausströmen oben ist der Druck innen und außen gleich ($p_a = p_i$ bei $h = H$; »Abströmbedingung«). Daraus berechnet man die Strömungsgeschwindigkeit $v = \sqrt{2gH(\rho_0/\rho_i - 1)}$ und die Druckdifferenz $p_a(h) - p_i(h) = (\rho_0 - \rho_i) g (H - h)$ in jeder Höhe h. Aus $\rho_i < \rho_0$ folgt $p_i < p_a$; wenn das Gas in der Dusche geringere Dichte hat, dann auch geringeren Druck, der es dem größeren Außendruck ermöglicht, den Duschvorhang einwärts zu drücken.



GRAFIKEN: THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

GABRIELA EINENKEL

Ein Kupferrohr aus der Sanitärabteilung vom Baumarkt, verchromt, gebördelt, 10 mm weit, 300 mm lang, daran angeklebt eine CD – und schon bläst der Zauberlehrling eine sehr große »Postkarte« in die Höhe.

▷ H_2O das Molgewicht nur 18 Gramm. Unter den gleichen meteorologischen Bedingungen hat er also nur 62 Prozent der Massendichte trockener Luft. Die feuchtwarme Luft innerhalb der Dusche ist demnach leichter als die trockenkalte Luft der Umgebung.

Aber woher rührt der niedrigere Druck im Inneren, der der Außenluft die Kraft gibt, den Duschvorhang in die Duschzelle zu drücken? Die Duschzelle ist eine Art Kamin. Anstatt die Luft in einem Brennraum mithilfe von Brennstoffen heiße Verbrennungsgase herstellen zu lassen, führt ihr der Duschstrahl in der Dusche Wärme und Feuchtigkeit zu und verringert dadurch (wenn auch nur wenig) die Dichte des Gases. Eingebettet in die dichtere Luft der Umgebung ist der Ruhezustand des Gasgemisches in der Duschzelle kein Gleichgewichtszustand. Würde man das gerade in der Duschzelle verweilende Gas mit einem leichten Plastiksack umgeben, entstünde eine Art »Warmluftballon«, der sofort aufsteigen würde, wenn man ihn ließe und er genügend Auftrieb hätte, seine eigene Hülle zu tragen. Ohne die Last der Hülle kommt das Gas nur umso rascher in Bewegung. Je mehr es an Fahrt gewinnt, umso mehr sinkt sein Druck. ◁

Wolfgang Bürger ist emeritierter Professor für Theoretische Mechanik an der Universität Karlsruhe.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

PREISRÄTSEL

Ungerade gewinnt

Von Pierre Tougne

Paul und Paula spielen »Ungerade gewinnt«. Gewinner des Spiels ist derjenige, der von einem Stapel mit 19 Münzen am Ende eine ungerade Anzahl gezogen hat. Beide ziehen abwechselnd eine oder zwei Münzen, bis der Stapel verbraucht ist. Paul beginnt.

Wer gewinnt das Spiel, wenn beide perfekte Spieler sind?

Welche Strategie gibt es für eine ungerade Anzahl N von Münzen, und welcher Spieler gewinnt?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Rucksäcke mit Fraktalmotiv »Elefant«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 17. Juni 2003, eingehen.

Lösung zu »Erleuchtung« (April 2003)

Jakob Weiß aus Syke empfiehlt den Gefangenen, in ihrer Zusammenkunft einen »Ausknipser« zu bestimmen. Alle anderen sind »Anknipser«.

Ein Anknipser schaltet die Glühbirne genau einmal an, und zwar wenn er sie erstmals nicht brennend vorfindet. Ist sie eingeschaltet oder hat er sie zuvor schon einmal angeknipst, tut er nichts.

Wenn der Ausknipser eine brennende Glühbirne vorfindet, weiß er, dass mindestens ein Gefangener, der vorher noch nie den Schalter betätigt hat, in dem Raum war. Dann schaltet er die Glühbirne aus und macht einen Strich auf einer (echten oder gedachten) Liste; andernfalls tut er nichts. Wenn $n-1$ Striche beisammen sind, weiß er mit Sicherheit, dass jeder Anknipser mindestens einmal im Raum war, und macht die alle befreiende Ansage.

Das Verfahren erfordert extreme Geduld. Der Ausknipser muss mindestens $(n-1)$-mal das Zimmer besucht haben. Da er im Schnitt alle n Tage ausgelost wird, dauert das etwa $n(n-1)$ Tage oder bei $n=100$ Gefangenen reichlich 27 Jahre! Obendrein müsste zwischen je zwei Besuchen des Ausknipsers mindestens ein Anknipser seinen ersten und einzigen Dienst verrichtet haben, was allerdings mit großer Wahrscheinlichkeit der Fall ist.

In der Variante von Hartmut Schönborn sind alle Beteiligten gleichberechtigt. Die Häftlinge werden von 1 bis n durchnummeriert und die Tage der Haftzeit auch: Auf den Tag n folgt wieder Tag 1 und so weiter. Jeder Häftling führt eine Strichliste mit Feldern von 1 bis n.

Kommt ein Häftling an einem Tag seiner Zahl in den Raum, so knipst er das Licht stets an; ansonsten knipst (oder lässt) er es aus. Wenn das Licht brannte, als er kam, macht er auf seiner Liste einen Strich in das Feld mit der Nummer von gestern; denn dann war gestern der zugehörige Häftling im Raum. Sowie irgendeiner seine Strichliste voll hat, spricht er die befreienden Worte. Schneller geht es, wenn jeder auch dann das Licht anschaltet, wenn er weiß, dass der Kollege mit der Nummer von heute bereits im Raum war.

Aber bei den langen Wartezeiten ist eine Risikostrategie attraktiv: vier Jahre abwarten und dann behaupten, dass alle schon im Raum waren. Die Wahrscheinlichkeit, dass dies nicht zutrifft, ist kleiner als 1:1000. Und was ist besser: mit Sicherheit frei nach weiteren 23 Jahren oder mit 99,9-prozentiger Wahrscheinlichkeit sofort?

Die Gewinner der schwebenden Kugelschreiber »Pen« sind Herbert Steinmetz, Jesberg; Herbert Sanders, Dinslaken; Dieter Schön, Markt Schwaben; Walter Bloch, Langendorf (Schweiz); und Markus Irniger, Wallisellen (Schweiz).

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

ALFRED T. KAMAJIAN

Paralleluniversen

Nicht nur in Science-Fiction-Romanen ist unser Universum bloß eines unter vielen. Auch Kosmologen und Quantentheoretiker postulieren parallele Welten.

WEITERE THEMEN IM JULI

Biometrie

Was Unternehmen längst recht ist, soll dem Verbraucher bald billig sein: Fingerabdruck, Irisstruktur, Stimme und andere unverwechselbare Merkmale einer Person sollen künftig Kennwörter und Geheimzahlen ergänzen.

Die Chemie beherrschen

In den letzten 25 Jahren haben es die Chemiker gelernt, den Verlauf ihrer Reaktionen immer genauer zu verfolgen und besser zu steuern.

Eine Pille gegen das Altern?

Schwierig, aber offenbar nicht länger unmöglich ist die Entwicklung von Arzneistoffen, die zu längerem Leben und zugleich besserer Gesundheit verhelfen. Sie sollen die Effekte einer hochwertigen Schmalkost imitieren.

SLIM FILMS

Grid Computing

Wozu ein Computer im Haus? Bei uns kommt die Rechenleistung aus der Steckdose. »Grid Computing« soll jedem den Zugang zu den Kapazitäten eines Superrechners verschaffen – und zwar einfach durch Einstöpseln.

LANDESGENDARMERIEKOMMANDO FÜR TIROL / AUSTRIA

Neue Forschungsergebnisse über Ötzi

Dem steinzeitlichen Gletschermann aus den Ötztaler Alpen entlocken Forscher immer noch neue Einzelheiten zu seinem Leben und Sterben. Pflanzenanalysen kreisen nun sogar seinen Wohnort und den genauen Todeszeitpunkt ein.